



Représentations cartographiques intermédiaires : comment covisualiser une carte et une orthophotographie pour naviguer entre abstraction et réalisme ?

Charlotte Hoarau

► To cite this version:

Charlotte Hoarau. Représentations cartographiques intermédiaires : comment covisualiser une carte et une orthophotographie pour naviguer entre abstraction et réalisme ?. Géographie. Université Paris-Est, 2015. Français. NNT : 2015PESC1011 . tel-01384943

HAL Id: tel-01384943

<https://theses.hal.science/tel-01384943>

Submitted on 20 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse

Présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Université Paris-Est
Spécialité : Sciences et Technologies de l'Information Géographique

Représentations cartographiques intermédiaires

Comment covisualiser une carte et une orthophotographie
pour naviguer entre abstraction et réalisme ?

Charlotte Hoarau



Soutenue publiquement le 2 juillet 2015 devant le jury composé de :

Paule-Annick Davoine, Maître de conférences, HDR, Grenoble-INP.....Rapporteur
Christophe Hurter, Professeur, Ecole Nationale de l'Aviation Civile.....Rapporteur
Sara Irina Fabrikant, Professeur, Université de Zurich.....Examineur
Thomas Corpetti, Directeur de recherche, Université de Rennes 2.....Président du Jury
Laurent Jégou, Maître de conférences, Université de Toulouse.....Examineur
Sidonie Christophe, Chargée de recherche, IGN.....Encadrante
Sébastien Mustière, Ingénieur, HDR, IGN.....Directeur de thèse

CETTE THÈSE a été réalisée à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), au COGIT, 73 avenue de Paris, 94160 Saint-Mandé, France; sous la direction de Sébastien Mustière et l'encadrement de Sidonie Christophe.

Fiche bibliographique BibTeX :

```
@ PhdThesis{Hoarau2014PhD,  
  author = {Hoarau, Charlotte},  
  day = {2},  
  month =juil ,  
  year = 2015,  
  title = {Représentations cartographiques intermédiaires - Comment covisualiser une carte et une orthophotographie  
pour naviguer entre abstraction et réalisme ?},  
  school = {Université Paris-Est},  
  address = Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), COGIT, 94160 Saint-Mandé, France  
}
```

*Le seul véritable voyage, le seul bain de Jouvence, ce ne serait pas d'aller vers de nouveaux paysages,
mais d'avoir d'autres yeux, de voir l'univers avec les yeux d'un autre, de cent autres,
de voir les cent univers que chacun d'eux voit, que chacun d'eux est.*

Marcel Proust, La Prisonnière.

Résumé

Représentations cartographiques intermédiaires Comment covisualiser une carte et une orthophotographie pour naviguer entre abstraction et réalisme ?

Deux représentations du territoire sont majoritairement proposées pour être covisualisées de multiples façons (loupe, curseurs, vues asservies, etc.) : la carte topographique et l'orthophotographie. Ces deux représentations apportent une vision complémentaire du territoire : la carte topographique est l'archétype même de l'abstraction et l'orthophotographie renvoie une perception réaliste du territoire. Pour permettre à l'utilisateur de covisualiser ces deux types de représentations, nous préconisons de ne pas chercher un mélange graphique idéal mais plutôt de produire un continuum cartographique formé d'un ensemble continu de représentations intermédiaires mixant données topographiques et orthophotographie. Notre objectif est de permettre à l'utilisateur de choisir sa position entre les deux extrémités en contrôlant le degré de réalisme et d'abstraction tout au long du continuum.

Notre approche se fonde sur la nécessité d'adaptation locale de la symbolisation des données topographiques pour assurer la lisibilité de chaque représentation intermédiaire, la création de transitions graphiques pour établir une continuité entre ces représentations, et la synchronisation des symbolisations visant à garantir une homogénéité visuelle de ces représentations mixtes. Nous proposons une méthode de conception reposant sur la combinaison de briques de symbolisation élémentaires. Le premier type de brique consiste à interpoler les paramètres de symbolisation de la norme SLD tels que la couleur, la transparence ou la texture (procédurale, naturelle, ou mixée) entre deux symbolisations données. Le second type de brique analyse le contexte graphique des objets à mettre en valeur afin de déterminer localement une symbolisation adaptée et lisible. Ces briques sont combinées pour chaque thème et coordonnées entre les différents thèmes. Nous émettons des préconisations de paramétrage de ces étapes de conception à partir des résultats de notre test utilisateur visant à estimer le degré de réalisme et d'abstraction des symbolisations cartographiques. Enfin, nous mettons en œuvre cette méthode de conception au sein de la plateforme de recherche GeOxygene sous la forme d'un outil permettant de naviguer dans un continuum cartographique entre réalisme et abstraction.

Mots-clefs : Géovisualisation, Visualisation, Covisualisation, Cartographie, Symbolisation adaptative, Interpolation de symbolisation, Continuum cartographique, Représentation intermédiaire, Réalisme, Abstraction.

Abstract

In-between cartographic representations How to covisualize maps and orthoimages to browse abstraction and realism ?

Two representations of the territory are widely provided simultaneously to the user through interactive tools (such as magnifiers, sliders or swipes): topographic maps and orthoimages. They provide complementary visions of the territory because of abstraction steps used to design maps and the intrinsic perceived photorealism power of orthoimages. Aiming at providing efficient covisualizations of these two representations to the user, we advise not to search for an ideal graphic mix, but to produce a cartographic continuum composed of in-between representations mixing topographic data and orthoimagery. Our objective is to provide interactive tools allowing to choose an intermediate step within the continuum by controlling the realism and abstraction levels.

Our approach is based on three principles: first, the need for local adaptation of vector data symbolisation to preserve their readability, second, the call for graphic transitions to establish a continuity through in-between cartographic representations, and third the required control over realism level in order to ensure a visual consistency of hybrid visualisations. We provide elementary symbolisation methods to be combined in a global design process. The first one aims at interpolating SLD symbolisation parameters such as color, opacity or texturing between two symbolisations. The second one aims at defining a local symbolisation depending on the graphic context of objects to be highlighted. Those symbolisations are combined for each theme and synchronized for all themes. For these design steps, we provide guidelines based on the evaluation of the realism level coming from our user test. Finally we build a prototype software allowing to test our propositions and browse in-between representations from abstraction to realism through an interactive slider.

Keywords : Geovisualization, Visualization, Covisualization, Map design, Adaptive symbolisation, Symbolization interpolation, Cartographic continuum, In-between représentations, Realism, Abstraction.

Remerciements

En musique, une partition se transforme en chef d'œuvre par le mélange des sons, l'enchaînement des rythmes et le partage des interprétations. Mon travail de thèse doit beaucoup à tous les musiciens de la cartographie qui m'ont accompagnée dans ma découverte des différentes sonorités cartographiques, interprétations sémiologiques et autres rythmes interactifs. A l'heure de finaliser mon mémoire, je souhaite ici remercier vivement tous ceux qui ont apporté leur note personnelle à cette partition, ainsi que l'IGN de m'avoir offert la possibilité de la composer dans des conditions exceptionnelles.

Tout d'abord, je tiens à remercier Sébastien et Sidonie, qui ont joué leur rôle de chef d'orchestre avec brio, en portant un intérêt sans faille à mes propositions tout en me guidant pour trouver ma place à l'intermédiaire de leurs tonalités respectives. Merci de m'avoir laissé explorer le sujet à mon rythme, en m'encourageant dans la phase de déchiffrage, et en m'aidant à garder le tempo pendant la rédaction. J'espère sincèrement que ce travail n'est que le début d'une recherche commune à venir.

J'adresse mes remerciements à tous les membres du jury. Leur participation à la soutenance en a fait un point d'orgue idéal pour clore le travail réalisé et ouvrir de nouvelles pistes de recherche. Merci aux rapporteurs, Christophe Hurter et Paule-Annick Davoine, d'avoir porté sur le mémoire un regard exigeant et constructif qui m'a permis d'affiner ma vision du sujet et d'enrichir ma présentation orale. Merci également aux examinateurs, Sara Fabrikant, Thomas Corpetti et Laurent Jégou, et à l'ensemble du jury, d'avoir manifesté leur intérêt et leur enthousiasme pour mon sujet de recherche pendant la soutenance. Je vous remercie tous et espère poursuivre les discussions issues de la soutenance prochainement, à CopaCabana ou ailleurs.

Une partition ne serait rien sans les musiciens qui l'interprètent au quotidien. Je tiens donc à remercier mes collègues présents et passés de créer un cadre scientifique stimulant et passionné au sein duquel j'ai eu, j'ai et j'aurais toujours grand plaisir à travailler.

Un grand merci à Anne qui m'a transmis sa passion de la recherche et de la cartographie dès mon arrivée au COGIT, qui a cru en moi dès le début, et m'a soufflé très peu subtilement l'idée d'entreprendre un travail de thèse. Merci aussi à Bénédicte qui m'a fait découvrir le domaine de la géovisualisation durant mon premier passage au COGIT : ce prélude m'a permis d'identifier mon intérêt pour la visualisation de données géographiques et la prise en compte de l'utilisateur.

Merci à tous mes collègues du COGIT, et particulièrement des différents axes de recherche auxquels j'ai participé. Il m'est bien sûr impossible de les citer tous, mais je pense à tous ceux qui ont contribué à rendre mes journées à la fois enrichissantes scientifiquement et chaleureuses humainement. C'est une chance de pouvoir mener un travail de recherche au sein d'une équipe aussi exigeante et conviviale à la fois.

Merci également à mes collègues croisés dans les projets collaboratifs MapStyle et MapMuxing. Pouvoir échanger des connaissances, des méthodes, et des outils issus de différents domaines de recherche autour d'un projet commun est très enrichissant pour un doctorant. Je suis très heureuse de poursuivre aujourd'hui mes travaux au sein de cette sympathique polyphonie scientifique.

Merci enfin à Bernie et Helen Jenny qui m'ont accueillie pendant trois mois dans leur laboratoire de recherche en cartographie, au fin fond de l'Oregon, et à l'ensemble des membres du Carto Group de l'université de Corvallis. Une fois le choc des cultures cartographiques passé, cet interlude m'a permis d'envisager ma problématique de thèse sous un jour nouveau, en découvrant des méthodes de conception cartographique novatrices, au sein d'une équipe cosmopolite, dynamique et accueillante.

Dans la musique, il faut également savoir écouter le silence. Aussi, je souhaite remercier tout ceux qui ont œuvré sans bruit, pour me permettre de faire taire le vacarme assourdissant des questionnements scientifiques lorsque cela était possible ou nécessaire.

Merci à mes copines du midi, Amélie, Marjorie, Floryne, Marion, Elodie, Sidonie et Nathalie qui m'ont accompagnée manger au bord du lac, à la cantine ou au petit japonais du coin, et m'ont encouragée à courir, nager, sauter, soulever, etc. au gré de ma motivation, et à mon rythme ! Merci à Bertrand de m'avoir escortée lors de sprints finaux mémorables. A toi maintenant de franchir la 50^{ième} ligne d'arrivée ;-)

Merci à mes amis de la géomatique ou d'ailleurs, les amateurs de danse conceptuelle, la CarthaTeam, les copines du lycée, les habitués des Canons, du Cerf et de la Cantine, qui ont su maintenir la cadence effrénée des sorties, weekends, soirées et autres réjouissances et m'ont permis de garder un pied bien ancré dans la vraie vie, celle où l'on se doit d'improviser.

Merci à mes parents et ma famille qui m'ont accompagnée tout au long de ce travail. Merci à mon père, Alain, que nous surnommions Perlin bien avant que je m'intéresse aux textures procédurales, de m'avoir conseillée depuis toute petite de me former à un métier "qui n'existe pas encore". Il ne croyait pas si bien dire à l'époque où la Géomatique était en train de s'inventer petit à petit. Merci à maman, Nat', qui m'a toujours soutenue pour mener à bien tous les projets, activités, etc. dont je remplissais frénétiquement mes journées, de m'avoir aussi aidé à finaliser ce mémoire. Merci enfin à mes frères et sœur, d'avoir représenté la Casa Hoarau lors de ma soutenance et de m'avoir épaulée tout au long de mes années de thèse. J'espère leur avoir transmis en retour mon goût pour la recherche.

Enfin, Merci à Dami, de son soutien inaltérable, de transposer notre passion de la géomatique dans nos loisirs et de naviguer avec moi au quotidien pour former une équipe de choc dans laquelle je peux composer vie personnelle et professionnelle en harmonie et en couleurs.

Table des matières

I	CHRONIQUE D'UNE EXTENSION ANNONCÉE DE L'ESPACE DES POSSIBLES CARTOGRAPHIQUES	1
1	Multiplication des modes de représentation du monde	2
1.1	Visualisation : de la donnée à l'information géographique	3
1.1.1	Diversité des données géographiques	3
1.1.2	Représentations, usages et applications cartographiques	7
1.2	Panorama de représentations cartographiques mixtes	12
1.2.1	Fond de carte topographique et cartographie thématique	13
1.2.2	Photocartes et Spatiocartes	15
1.2.3	Géoportails : porte d'accès aux données spatiales	15
1.2.4	Mashups : intégration de données utilisateur	18
1.2.5	Cartes à l'emporte-pièce	20
1.2.6	Représentations cartographiques multi-perspectives	21
1.2.7	Réalité augmentée et réalité virtuelle	23
1.2.8	Un premier constat : une utilisation croissante de fonds orthophotographiques	26
1.3	Géovisualisation : visualiser et interagir avec plusieurs représentations	30
1.3.1	Personnalisation de la représentation mixte	31
1.3.2	Covisualisation de représentations cartographiques	35
1.3.3	Un deuxième constat : un besoin grandissant d'interactivité et de navigation entre représentations cartographiques	43
1.4	Enquête sur l'utilisation des fonds cartographiques et orthophotographiques	44
1.4.1	Méthodologie : sites étudiés et informations collectées	44
1.4.2	Portrait général du panel de sites web étudié	47
1.4.3	Analyse des représentations cartographiques mixtes proposées	49
1.4.4	Un troisième constat : aller au-delà de la transparence	51
1.5	Objectif de la thèse : concevoir des représentations intermédiaires//pour naviguer d'une carte topographique à une orthophotographie	52
2	Verrous pour la conception de représentations cartographiques mixtes et réalistes	54
2.1	Appliquer la sémiologie (carto-)graphique aux fonds orthophotographiques	55
2.1.1	Conception de légende et sémiologie graphique	55
2.1.2	Méthodes de symbolisations spécifiques à l'utilisation de fonds orthophotographiques	59
2.2	Contrôler le degré de réalisme et d'abstraction	61
2.2.1	L'abstraction comme outil de simplification de l'information	63
2.2.2	Le réalisme comme levier de communication de l'information	68
2.2.3	Des représentations cartographiques de plus en plus réalistes	71

2.2.4	Continuums de styles cartographiques	76
2.2.5	Influence du degré de réalisme sur la perception de l'utilisateur	78
2.3	Explorer des méthodes de rendu mixtes	79
II REPRÉSENTER L'INTERMÉDIAIRE POUR NAVIGUER ENTRE DEUX EX-TRÊMES		83
3	Approche générale : représentations mixtes et intermédiaires	84
3.1	1 ^{er} principe : nécessité d'une adaptation locale pour la lisibilité des symbolisations	85
3.2	2 ^e principe : transitions graphiques pour la continuité entre représentations intermédiaires	94
3.3	3 ^e principe : synchronisation des symbolisations pour l'homogénéité des représentations inter-médiaires	97
3.4	Positionnement par rapport au processus de conception cartographique	98
4	Méthode de conception d'un continuum cartographique	100
4.1	Inspiration graphique issue de l'orthophotographie	100
4.1.1	Extraire la couleur naturelle pour camoufler la carte en s'inspirant de l'orthophotographie	101
4.1.2	Extraire ou générer une texture pour rendre la carte plus réaliste	103
4.2	Briques élémentaires de symbolisation	111
4.2.1	Adaptation locale des symbolisations pour la préservation de la lisibilité	111
4.2.2	Interpolation de symbolisations pour la création de continuums	121
4.2.3	Coordination de symbolisations pour l'homogénéisation de la représentation	135
4.3	Test utilisateur pour le paramétrage des briques de symbolisation progressive	141
4.3.1	Ordonnancement des symbolisations selon leur degré de photoréalisme	142
4.3.2	Déclenchement des briques pour passer d'une représentation à l'autre	150
4.3.3	Correspondance des degrés de réalisme	155
5	Mise en œuvre : interpolation de la carte topographique à l'orthophotographie	158
5.1	Choix des données	158
5.2	Prototype pour la mise en œuvre : un curseur pour parcourir notre continuum	161
5.3	Exemples d'interpolations de symbolisations de la carte topographique à l'orthophotographie	166
5.3.1	Une symbolisation plus ou moins naturelle de la mer	166
5.3.2	Une symbolisation plus ou moins abstraite et plus naturelle du réseau routier	168
5.3.3	Une symbolisation plus ou moins abstraite, naturelle et réaliste du bâti	170
5.3.4	Une symbolisation plus ou moins réaliste de la végétation	172
5.3.5	Une symbolisation plus ou moins texturée du fond de carte	174
5.4	Proposition d'un continuum progressif entre réalisme et abstraction	176
CONCLUSION GÉNÉRALE		181
6	Conclusion et Perspectives	182
ANNEXES		197
A	Caractérisation des données géoréférencées	198

A.1 Données vecteur ou données raster ?	198
A.2 Données géographiques ou cartographiques ?	200
B Enquête Géoportail	203
B.1 Liste des sites étudiés	203
B.2 Informations collectées	204
C Test utilisateur sur la perception du degré de réalisme et d'abstraction	207
C.1 Protocole de test	207
C.1.1 Questionnaire interactif	208
C.1.2 Matériel de test	210
C.2 Analyse du profil des participants	222
C.3 Analyse des réponses	224
C.3.1 Temps de réponses	224
C.3.2 Question 1 - Utilisation d'une texture de Perlin pour représenter la forêt	226
C.3.3 Question 2 - Qualifier le degré de photoréalisme	226
C.3.4 Question 3 - Classer selon le degré de photoréalisme	231
C.3.5 Question 4 - Degré de photoréalisme relatif dans un couple	233
C.3.6 Question 5 - Enchaîner les briques d'interpolation de symbolisations pour créer un continuum	237
C.3.7 Question 6 - Validation de l'ordre d'un continuum donné	240
C.3.8 Question 7 - Paramétrer le degré de photoréalisme au sein d'une représentation complète	242
 BIBLIOGRAPHIE	 257
 LISTE DES FIGURES	 266
Publications personnelles principales	267

Première partie

Chronique d'une extension annoncée de l'espace des possibles cartographiques



Chapitre 1

Multiplication des modes de représentation du monde

LA MULTIPLICATION des modes de représentation du monde réel est intimement liée à la diversification des usages visés par ces représentations et à l'émergence de moyens technologiques de communication. L'apparition de l'informatique, l'accessibilité à Internet et l'interactivité croissante entre les utilisateurs permise par les technologies du Web 2.0 sont autant de ruptures technologiques majeures qui ont métamorphosé l'acquisition, le traitement et le partage de l'information.

Plus particulièrement, en ce qui concerne l'information géographique, l'apparition de méthodes d'acquisition numérique de données géolocalisées (caméras numériques, systèmes de GNSS, lidar aéroporté, etc.) a conduit à une *géonumérisation* systématique de la Terre ainsi qu'à la naissance d'une nouvelle discipline, la Géomatique. Cette discipline vise à l'exploitation des moyens informatiques pour la gestion de l'information géographique. Ainsi, de nombreux usages directement liés au traitement automatique de l'information géographique ont émergé, engendrant la création de toujours plus de données à référence spatiale ainsi que de représentations directes de ces données ou des résultats de leur analyse.

Par ailleurs, dans le domaine de l'informatique graphique, la nécessité de disposer d'outils informatiques pour la communication visuelle adaptés à la transmission d'un message spécifique a donné naissance à des sous-domaines scientifiques tels que le rendu photoréaliste et le rendu expressif, impliquant la recrudescence de représentations graphiques stylisées toujours plus diverses.

Considérer cette évolution applicative, technologique et scientifique dans les domaines de la cartographie et de l'informatique graphique, c'est prendre acte de la nécessité d'étudier en détail ces représentations du monde réel, leur adéquation à l'usage visé et la pertinence des moyens mis en œuvre pour les concevoir. Dans un premier temps, nous décrivons le mécanisme de visualisation permettant à l'utilisateur de passer de la donnée localisée à l'information (Cf. §1.1). Puis, nous dressons un panorama de représentations cartographiques mixtes existantes (Cf. §1.2), et d'applications de géovisualisation permettant d'interagir avec ces représentations (Cf. §1.3). Enfin, nous présentons une enquête visant à analyser les usages des différents fonds de carte actuellement disponibles (Cf. §1.4) avant d'exposer les objectifs de notre travail de thèse (Cf. §1.5).

La **géonumérisation** est définie par Joliveau [2011] comme un processus accéléré de transcription sous forme de données numériques de la plupart des objets, êtres, phénomènes, dispositifs, activités, images, sites Web, flux Rss, etc. localisables sur la surface terrestre.

1.1 Visualisation : de la donnée à l'information géographique

La visualisation est définie dans le langage courant comme étant la

"présentation visuelle sur un écran, sous forme d'image alphanumérique ou graphique, d'un ensemble d'informations traitées par des moyens informatiques." Larousse [2010].

En cartographie, ce mécanisme consiste à présenter à l'utilisateur des données géographiques sous la forme d'une représentation cartographique par le biais d'une interface de visualisation, souvent interactive. Nous décrivons dans un premier temps la diversité du matériau de base que sont les données géographiques (Cf. §1.1.1), avant de montrer comment la visualisation cartographique intervient dans la création d'information géographique (Cf. §1.1.2).

1.1.1 Diversité des données géographiques

La géonumérisation progressive de la surface de la Terre a généré ces dernières décennies la création de nombreuses données géographiques et cartographiques. Ces données sont progressivement disponibles en téléchargement et/ou accessibles par le biais de géoportails, d'applications cartographiques en ligne ou sous la forme de flux de données, et sous différentes conditions de gratuité ou d'ouverture de données. Dans ce paragraphe, nous dressons un panorama (non exhaustif) des données géographiques existantes et largement utilisées, selon leur source de production, afin d'en capter la diversité et l'hétérogénéité.

D'une part, les producteurs institutionnels de données géographiques traditionnels fournissent une description topographique du territoire. En France par exemple, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) a pour mission de produire, diffuser et d'archiver les données nécessaires à la description géométrique et physique du territoire, son occupation du sol et à l'inventaire de ses ressources forestières. Pour cela, il constitue et entretient le Référentiel à Grande Echelle (RGE), qui est un

"système intégré d'information géographique couvrant l'ensemble du territoire national, [...] composé de bases de données numérisées et interopérables décrivant les thèmes, dénominations géographiques, unités administratives, adresses, parcelles cadastrales issues du plan cadastral, réseaux de transport, hydrographie, altitude, occupation des terres, ortho-imagerie et bâtiments." ¹

La figure 1.1 illustre les composantes du RGE que sont la BD TOPO®, la BD ORTHO®, la BD PARCELLAIRE®, la BD ADRESSE® et la BD ALTI®. Ces données topographiques de référence laissent déjà entrevoir une grande diversité dans la modélisation du territoire. La BD TOPO délivre une description topographique en détaillant la position, la forme et la nature des objets géographiques. La BD ORTHO® délivre une image photographique du territoire issue de prises de vue aériennes traitées pour être superposables à une carte. La BD ADRESSE® délivre une liste des adresses postales associées à leur position géographique. La BD PARCELLAIRE® délivre un inventaire des parcelles de propriétés. La BD ALTI® délivre une description continue des altitudes au sol. Ces bases de données contiennent donc des informations de natures différentes et sont issues de processus d'acquisition et de conception différents.

¹Description des missions statutaire de l'IGN : <http://www.ign.fr/institut/institut/statut-et-missions>, consulté le 8 Octobre 2014.

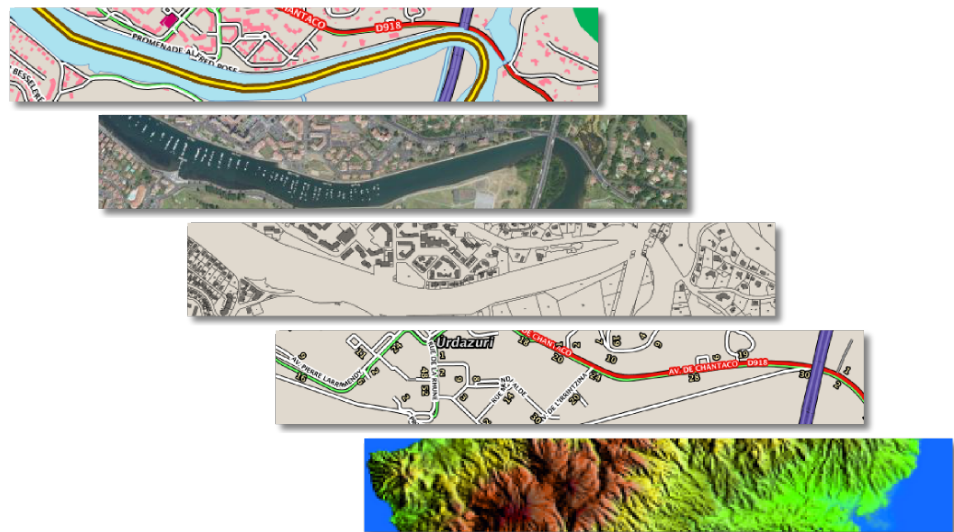


FIGURE 1.1 : Les composantes du RGE de l'IGN : extraits de la BD TOPO®, BD ORTHO®, BD PARCELLAIRE®, BD ADRESSE®, BD ALTI®.

D'autre part, comme encouragés par la directive européenne Inspire, bien d'autres services de l'État comme les collectivités territoriales produisent et mettent à disposition des données géographiques. Les figures 1.2 et 1.3 illustrent par exemple des données utiles aux deux branches principales de la géographie moderne : la géographie physique dont l'objet d'étude est le milieu naturel et la géographie humaine visant à expliquer les activités humaines dans ce milieu.

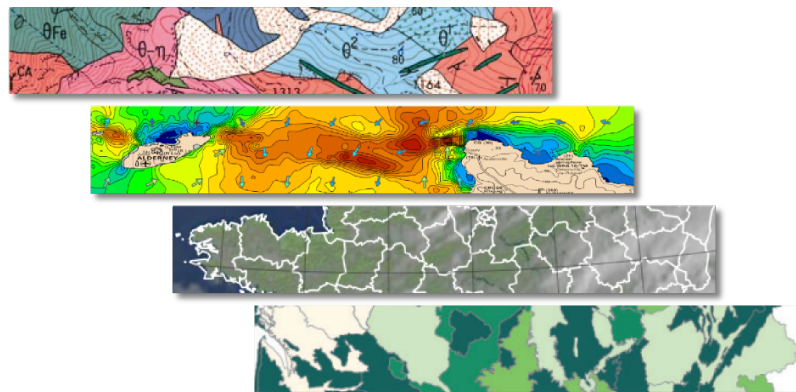


FIGURE 1.2 : Illustrations de données utiles à la géographie physique : données géologiques du BRGM⁶(Bureau de Recherches Géologiques et Minières), données maritimes du SHOM⁷(Service hydrographique et océanographique de la marine), données météorologiques de Météo-France⁸et données forestières de l'IGN⁹.

⁶La description des cartes et produits numériques du BRGM est consultable à l'adresse suivante : www.brgm.fr/sites/default/files/plaquette_objets_50_0.pdf.

⁷Les données de référence du SHOM sont consultables par le biais d'une interface de visualisation cartographique à l'adresse suivante : data.shom.fr.

⁸Météo-France propose des animations de ses observations satellite à l'adresse suivante : <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>.

⁹Les chiffres clés concernant les forêts françaises sont consultables à l'adresse suivante : <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article583>.

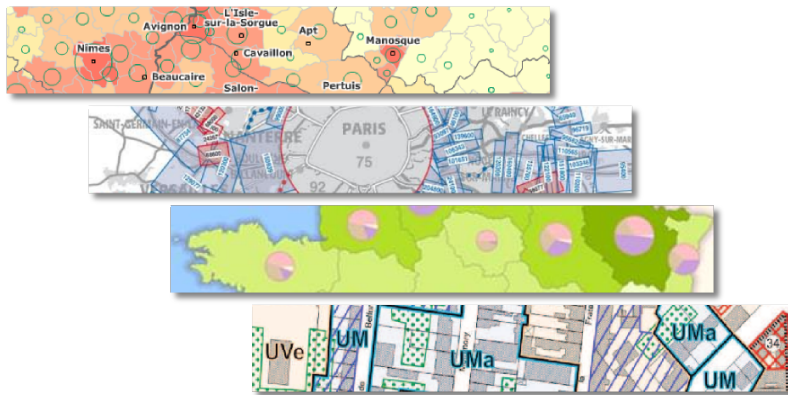


FIGURE 1.3 : Illustrations de données utiles à la géographie humaine : données de population de l'INSEE¹⁴, données de trafic du Setra¹⁵, données sur la consommation énergétique du Ministère du Développement Durable¹⁶ et données d'urbanisme, le Plan Local d'Urbanisme (PLU) de la ville de Vincennes¹⁷.

Il existe également des producteurs privés de données fournissant des données géographiques, parfois pour les commercialiser en tant que telles, d'autres fois pour susciter l'apparition de nouveaux usages. La figure 1.4 illustre par exemple des données de trafic routier vendues et utilisées dans certains *géonavigateurs*, et présente une visualisation construite à partir de données libres d'utilisation d'un service de location de vélos.

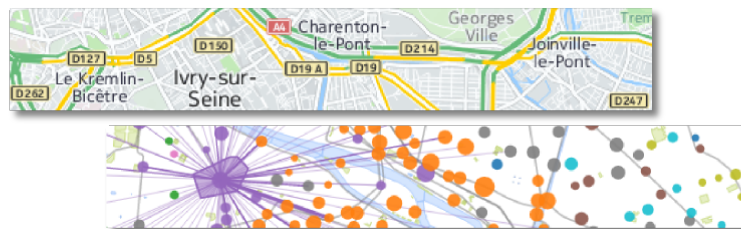


FIGURE 1.4 : Visualisations de données de trafic de Here²⁰, et de données issues du service Vélib'²¹.

Enfin, les technologies mises en place dans le cadre du *Web 2.0* ont généré la création de données géographiques participatives. La figure 1.5 illustre différents exemples de données géographiques créées, collectées et partagées par des communautés d'utilisateurs qui collaborent

Un **géonavigateur** est un « Système d'aide au déplacement individuel ou à la conduite de véhicules, qui utilise les indications de géolocalisation par satellite pour permettre le repérage et proposer un ou plusieurs itinéraires. » *Etat français [2010]*

Le **Web 2.0** est un ensemble de technologies web permettant la création de contenu issu de la communication, l'interaction et la collaboration des utilisateurs regroupés en communautés.

¹⁴Les données statistiques de l'INSEE sont consultables à l'adresse suivante : www.statistiques-locales.insee.fr/carto/ESL_CT_cartethematique.asp?nivgeo=CV&submit=0k.

¹⁵Les données de trafic routier du Setra sont consultables à l'adresse suivante : www.setra.developpement-durable.gouv.fr/cartes-de-recensement-de-la-a3236.html

¹⁶Les données de consommation d'énergie sont consultables sur le site du ministère du développement durable à l'adresse suivante : <http://www.datar.gouv.fr/observatoire-des-territoires/fr/la-consommation-denergie-finale-rapportee-au-pib-regional>

¹⁷Le plan local d'urbanisme de la ville de Vincennes est consultable à l'adresse suivante : <https://www.vincennes.fr/Cadre-de-vie/Urbanisme/Plan-Local-d-Urbanisme>

²⁰Les données de trafic routier de l'application Here sont consultables à l'adresse suivante : <http://here.com/traffic>

²¹Cette visualisation interactive des données de fréquentation du service Vélib', réalisée par Etienne Côme, est disponible à l'adresse suivante : <http://www.comeetie.fr/galerie/velib/>

entre eux. La figure 1.6 présente des représentations de données géographiques issues d'une utilisation géolocalisée des réseaux sociaux.



FIGURE 1.5 : Données topographiques du projet collaboratif OpenStreetMap²⁴ (OSM), données d'itinéraires de randonnées VTT du site communautaire Uttagawa²⁵.

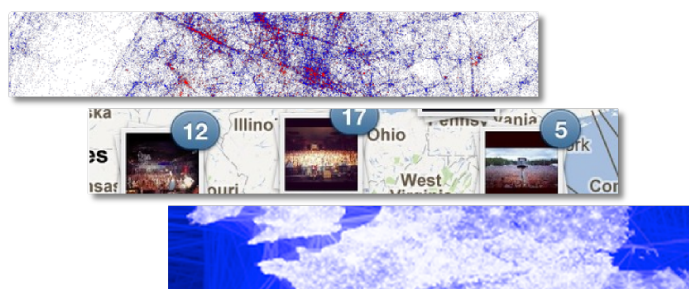


FIGURE 1.6 : Représentations de données géolocalisées issues de Twitter²⁹, Instagram³⁰ et Facebook³¹.

L'émergence de ces données géolocalisées directement issues de l'utilisateur bouleverse son rapport à la représentation graphique. Il est naturellement enclin à inclure les données qu'il crée ou qu'il génère dans les représentations qu'il consulte afin de les contextualiser au sein d'un environnement topographique de référence ou de les comparer à celles d'autres utilisateurs de sa communauté.

Les exemples de données géographiques présentées ci-dessus attestent d'une grande diversité et font pressentir un potentiel intéressant d'utilisation conjointe de ces données dans un même processus cartographique. Néanmoins, il existe des sources d'hétérogénéité entre les différentes données géographiques disponibles qui constituent un frein à leur utilisation conjointe. Les données présentent des **types géométriques** différents pour la modélisation de la position et de la forme des objets géographiques (Cf. Annexe A.1). En cela, elles transmettent une information de nature différente, répondant à des usages divers. La **nature cartographique ou géographique** des données (Cf. Annexe A.2) génère également des représentations divergentes d'un même objet : les unes étant destinées à être visualisées au sein d'une représentation cartographique, les autres ayant vocation à archiver et analyser la connaissance géographique. Selon cette nature géographique ou cartographique, les données auront un **niveau de détail** et une **échelle** de saisie

²⁴Le site du projet collaboratif OSM est accessible à l'adresse suivante : osm.org

²⁵Le site communautaire de VTTistes Utagawa est accessible à l'adresse suivante : www.utagawavtt.com.

²⁹Le réseau social de messagerie instantanée Twitter est accessible à l'adresse suivante : twitter.com.

³⁰Le réseau social de partage de photos Instagram est accessible à l'adresse suivante : instagram.com.

³¹Le réseau social de partage de contenu personnel Facebook est accessible à l'adresse suivante : facebook.com.

et de visualisation différents. L'**actualité** et la date d'acquisition des données leur confèrent une validité temporelle. Celle-ci permet de garantir ou d'invalider la cohérence de résultats obtenus en utilisant des données hétérogènes temporellement. Enfin, Girres [2012] identifie les sources d'imprécision qui confèrent une **qualité géométrique** propre à chaque jeu de données.

La grande diversité des données géographiques préfigurent un formidable potentiel d'utilisation conjointe de ces données pour construire des représentations composites, hybrides et hétérogènes. En particulier, l'augmentation du volume des données géographiques issues de l'utilisateur apparaît comme une motivation supplémentaire d'intégration de données hétérogènes au sein d'une même représentation. Différentes sources d'hétérogénéité constituant autant de causes d'incompatibilité potentielle ont été identifiées et devront être prises en compte pour utiliser conjointement des données différentes.

1.1.2 Représentations, usages et applications cartographiques

Dans cette section, nous décrivons les facteurs ayant mené à une multiplication de ces représentations cartographiques que sont l'évolution du rôle de la carte face aux progrès scientifique et technologique, l'évolution du rôle de l'utilisateur et l'élargissement des domaines d'application de la géomatique. Pour cela, nous analysons les liens existants entre les trois éléments du triptyque cartographique illustré en figure 1.7 : les représentations cartographiques, les usages de ces représentations et leurs domaines d'application. Ce triptyque s'auto-alimente de façon autonome, la multiplication des uns engendrant la multiplication des autres. Enfin, nous détaillons en quoi la visualisation interactive de ces éléments joue un rôle déterminant dans la construction et la compréhension de l'information géographique.

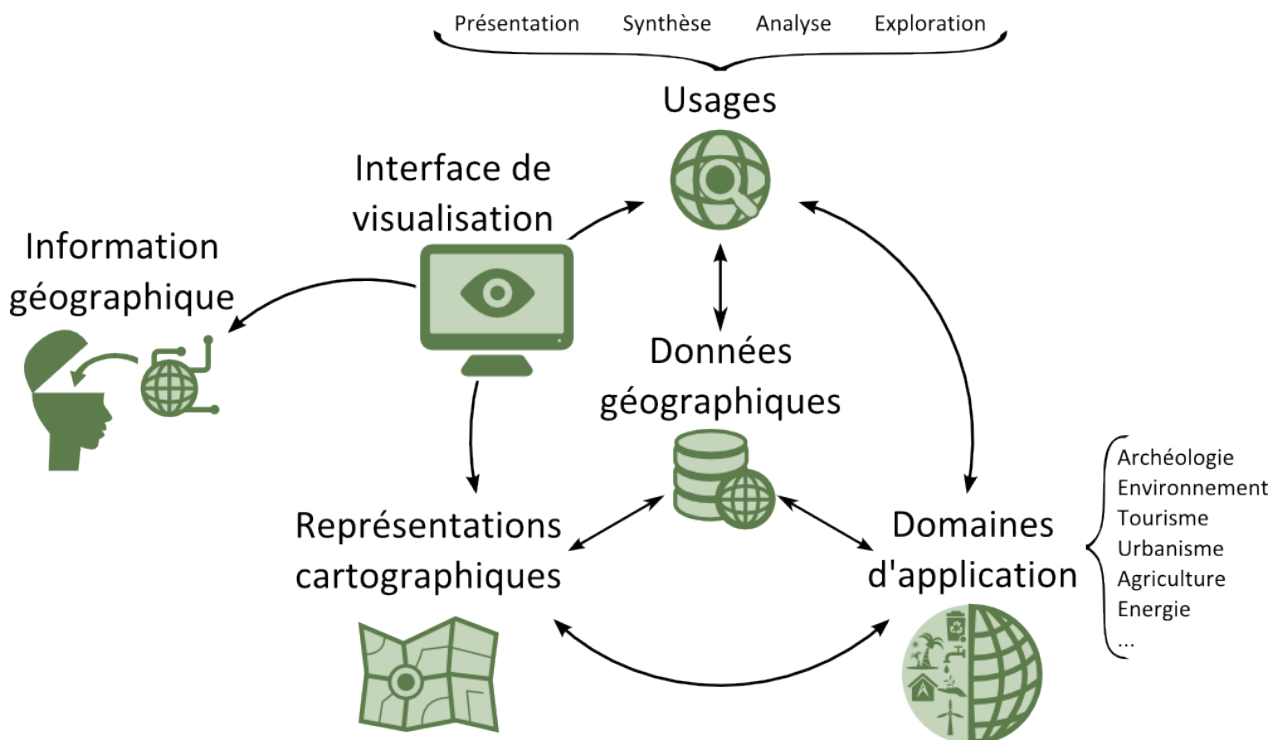


FIGURE 1.7 : Triptyque cartographique et visualisation d'information géographique.

La carte en tant que représentation graphique du monde réel

Cartography is about representation.

Alan M. MACEachren, *How Maps Work*, p.1.

Le Comité Français de cartographie définit une carte comme étant une "représentation géométrique conventionnelle, en positions relatives, de phénomènes concrets ou abstraits, localisables dans l'espace". [CFC, 1990]

Aborder la cartographie sous l'angle de la représentation du monde réel comme nous y engage MacEachren [1995] dans les toutes premières lignes de son livre *How Maps Work*, est une façon d'étendre le paradigme de la cartographie comme processus de communication graphique synthétisé par Board [1972]. Cela permet d'envisager notre domaine de recherche dans sa globalité, et de prendre conscience des liens existants avec ses disciplines voisines que sont l'art, la psychologie cognitive, la sémiologie, etc. En effet, étymologiquement, Robert et al. [2008] définissent le fait de représenter comme le fait de

"Présenter à l'esprit (un objet absent ou un concept) en provoquant l'apparition de son image au moyen d'un autre objet qui lui ressemble ou qui lui correspond."

Considérer une carte comme une représentation nous invite donc non seulement à **prendre en compte la perception de l'utilisateur** lors de la mise en place d'un processus de conception cartographique à l'instar des partisans du paradigme de la carte comme média de communication, mais également à **comprendre les mécanismes cognitifs** mis en jeu dans l'usage des représentations cartographiques pour accéder à la connaissance en se créant une image mentale du territoire. De ce point de vue, la carte n'est plus nécessairement le support de communication d'un message prédéfini, elle peut également être la représentation d'un phénomène que l'utilisateur devra utiliser comme une source d'information.

Comme dans bien d'autres domaines, l'apparition et l'évolution des outils informatiques ont révolutionné la conception cartographique. Robinson et al. [1995] notent que la double fonction des cartes papier d'enregistrer l'information en tant que connaissance de référence, et de donner à voir la complexité du territoire représenté, a donné naissance à deux produits cartographiques dérivés : les bases de données géographiques et les représentations cartographiques. Cette évolution relève la carte de sa fonction historique d'inventaire du territoire que Béguin et Pumain [2010, p. 29] identifient comme "besoin [...] à l'origine de la création des « cartes »". Ainsi, la carte n'est plus dans l'obligation de sauvegarder l'ensemble de la connaissance géographique, puisque cette dernière est enregistrée dans des bases de données interrogeables. Cela implique une diversification des types de données et de représentations cartographiques, et un bouleversement du métier de cartographe qui n'est plus chargé d'acquérir les données géographiques mais bien d'en construire des représentations adaptées à différents usages. Cela simplifie également le dilemme consistant à trouver le bon compromis entre précision géométrique et lisibilité de la représentation : les données peuvent être acquises ou saisies puis stockées avec une grande précision géométrique, puis représentées de façon adaptée à l'échelle de représentation après avoir été généralisées (Cf Annexe A.2).

Parallèlement, l'objectif de conception d'une carte idéale pour un but donné est remis en cause. MacEachren [1994] dresse un état des lieux des différents rôles que peut jouer une carte le long d'un continuum de processus de consultation allant de la réflexion visuelle et personnelle à la communication visuelle et collective ; selon lui, cette diversité de fonctions implique nécessairement une diversité de méthodes de conception et de représentations cartographiques.

Il déconstruit ainsi le mythe de la carte unique et optimale répondant à un objectif prédéfini commun à tous les lecteurs de la carte, et ouvre la porte à l'intégration de processus d'adaptation et de personnalisation dans le processus de conception cartographique. Il fait également un pas vers le paradigme considérant la carte comme interface de visualisation.

Usages : la carte en tant que support de visualisation

Par la suite, quatre types d'usages majeurs de la carte en tant que support de visualisation sont identifiés par MacEachren et Kraak [1997] et analysés par la commission *Visualisation et environnements virtuels* de l'Association Cartographique Internationale (ACI) [MacEachren et Kraak, 2001] : la présentation, la synthèse, l'analyse et l'exploration. Ces différents usages s'organisent selon trois dimensions d'usage : le public visé, le niveau d'interaction proposé et la relation aux données, qui sont autant de source d'invitation à la *sérendipité* dans l'utilisation d'une carte. La carte devient donc réellement un support de visualisation, en cela qu'elle permet de "*rendre visible (un phénomène qui ne l'est pas).*" [Robert et al., 2008].

Le rôle du cartographe s'en trouve également redessiné : il lui faut désormais adapter le niveau d'interactivité au public visé et aux données représentées et anticiper un grand nombre de tâches cartographiques élémentaires qui seront réalisées par l'utilisateur, afin d'adapter la représentation cartographique qu'il construit et diffuse par le biais d'une interface de visualisation à l'usage qu'il vise. Les interfaces de visualisation forment ainsi un pont entre les données et leur représentation. Elles offrent un moyen de consulter ou d'explorer visuellement les bases de données géographiques numériques par le biais de représentations cartographiques lisibles et adaptées (à l'échelle, au support, à l'environnement de consultation, etc.).

Il existe plusieurs interfaces de visualisation permettant à l'utilisateur de choisir la représentation la plus adaptée à son besoin, parmi différentes représentations cartographiques réalisées à partir d'une même base de données. C'est le cas par exemple des différents produits cartographiques réalisés à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) à partir d'une base de données géographique unique (la BD UNI, base interne à l'IGN) et consultables par le biais du Géoportail³². De même, différents fonds de carte peuvent être créés par le biais d'applications de personnalisation du style telles que MapBox³³ ou MapStylR³⁴ qui utilisent respectivement les données du projet OpenStreetMap³⁵ et celles de GoogleMaps³⁶. A titre d'exemple, la figure 1.8 présente l'interface de visualisation de la carte mondiale issue du projet OpenStreetMap³⁴ qui propose différents fonds de carte issus de la base de données du projet. La sélection d'un fond de carte modifie à la fois la symbolisation et le contenu de la carte car les représentations proposées sont adaptées à différents usages et ne représentent donc pas tous les objets géographiques se trouvant dans la base de données du projet.

La *sérendipité* est « le don de faire des trouvailles ou la faculté de découvrir, d'inventer ou de créer ce qui n'était pas recherché dans la science, la technique, l'art, la politique et la vie quotidienne, grâce à une observation surprenante ». Van Andel et Bourcier [2009]

³²Le Géoportail est le portail d'accès national aux données géographiques de référence de l'IGN. Il est accessible à l'adresse suivante : www.geoportail.gouv.fr.

³³Le site de personnalisation MapBox permet de définir des légendes cartographiques adaptées aux données du projet OpenStreetMap. Il est accessible à l'adresse suivante : <https://www.mapbox.com/design/>.

³⁴Le site de personnalisation MapStylR permet de définir des légendes cartographiques adaptées aux données du projet GoogleMaps. Il est accessible à l'adresse suivante : <http://www.mapstylr.com/map-style-editor/>.

³⁵OpenStreetMap est un projet collaboratif de constitution d'une base de données géographique ouverte de la surface de la Terre. Le portail cartographique permettant de visualiser cette base de données sous la forme de différentes représentations cartographiques est accessible à l'adresse suivante : www.openstreetmap.org.

³⁶GoogleMaps est un service de cartographie en ligne fournissant un ensemble de représentations topographiques de la surface de la Terre. Son portail cartographique est accessible à l'adresse suivante : www.maps.google.fr.

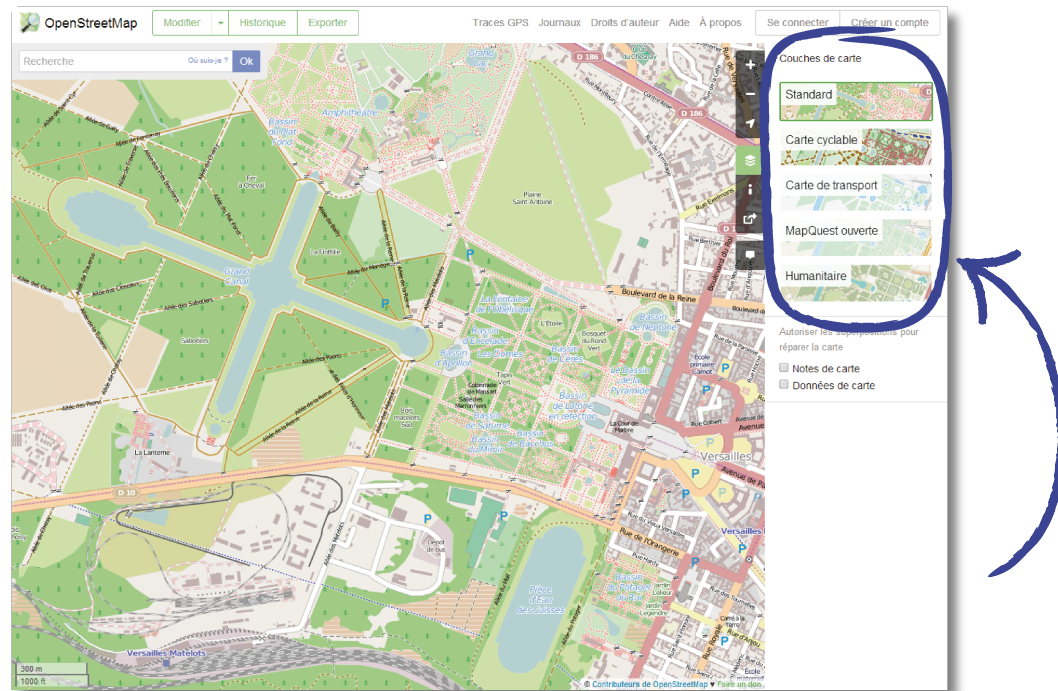


FIGURE 1.8 : Différents fonds de cartes réalisés avec une même base de données géographique, disponibles sur le portail cartographique du projet OSM et adaptés à différents usages.

Élargissement des domaines d'application de la géomatique

La diversification des données, des représentations et des usages cartographiques entretient l'élargissement des domaines d'application de la géomatique, phénomène qui n'est pas mesuré ni mesurable. Parmi les disciplines phares utilisant des données, outils et méthodes issus de la géomatique, la géographie fait office de fer de lance, mais on peut également citer l'environnement et la gestion des ressources naturelles, l'agriculture, l'aménagement du territoire, la gestion des transports, des risques ou des déchets, l'urbanisme, l'histoire, ou encore le secours aux personnes, la défense, le tourisme et le géomarketing, sans être exhaustif.

Ces domaines d'applications ont été intéressés soit par de nouveaux modes d'acquisition et l'apparition de nouvelles données à référence spatiale, soit par les évolutions régulières en termes d'outils d'analyse, de modes de représentation et de diffusion de l'information. Un exemple significatif est le développement des outils d'aide à la navigation couramment utilisés de nos jours dans les géonavigateurs, dans les applications de suivi de flotte ou de gestion de trafic et de prévision d'itinéraires.

Réciproquement, le fait que de plus en plus de domaines d'application utilisent des outils issus de la géomatique engendre la création de nouvelles données géographiques et cartographiques. A titre d'exemple, l'utilisation d'outils de géomatique pour l'analyse historique de l'évolution urbaine nécessite et implique la création de bases de données historiques [Dumenieu *et al.*, 2013]; de même, l'utilisation de dispositifs de localisation engendre la création de données de traces/trajectoires, nécessaires à l'analyse des déplacements [Buard, 2013]. De plus, la diversité de domaines d'application listés ci-dessus est indiscutablement une source inépuisable de représentations cartographiques très diverses.

Il se forme ainsi naturellement un phénomène d'accroissement mutuel entre les domaines

d'application de la géomatique d'une part et les données géographiques et représentations cartographiques d'autre part. Dans ce sens, Feyt [2011] plaide pour un renouveau des fonds de carte topographique en vue de mieux contextualiser les problématiques territoriales actuelles. Ce constat d'accroissement mutuel des données, représentations et domaines d'application cartographiques nous invite à questionner les usages de ces données et représentations afin de mieux comprendre le rôle de l'utilisateur dans la création d'information.

Évolution du rôle de l'utilisateur : interactions pour passer de la donnée à l'information

Le rôle de l'utilisateur et son rapport à la carte sont fondamentalement modifiés par l'utilisation d'une représentation cartographique par le biais d'une interface de visualisation interactive. Il doit être plus ou moins pro-actif pour lire, comprendre, déduire ou extraire des connaissances de la carte à partir de la visualisation qu'il en fera.

Afin d'anticiper les interactions potentielles d'un utilisateur avec une représentation cartographique, différents travaux en cartographie ont dressé un inventaire des tâches cartographiques qu'un utilisateur peut être amené à réaliser durant la visualisation de cette représentation. Boér *et al.* [2013] se fondent sur l'analyse exhaustive de Carter [2005] des différents usages d'une carte, et retiennent huit tâches cartographiques :

1. la localisation dans l'espace ;
2. le repérage d'un lieu ou d'un objet géographique ;
3. la préparation d'un itinéraire de voyage ;
4. la navigation et le calcul d'itinéraire en temps réel ;
5. l'identification de lieux d'intérêt ;
6. la communication pour présenter une idée, pour soutenir une idée ou pour l'éducation ;
7. l'archivage d'information spatiale ;
8. le tourisme virtuel et l'exploration de lieux à distance.

Ces tâches cartographiques sont plus ou moins complexes et impliquent des interactions avec la représentation plus ou moins sophistiquées. En vue de construire une *taxonomie* de primitives d'interactions cartographiques, Roth [2013] conduit des tests utilisateur lui permettant d'identifier des tâches cartographiques très génériques (l'identification, la comparaison, la classification ordonnée, l'association et la délimitation) et variées car réalisées selon des buts différents (l'obtention, la prédiction ou la prescription d'information) et opérant sur des ensembles différents (l'espace seul, les attributs concernant l'espace et l'espace dans le temps).

C'est l'enchaînement de ces tâches cartographiques au cours du processus de visualisation qui permettra ou non à l'utilisateur d'extraire une information à partir de la représentation cartographique. A ce propos, Puissant [2003, p. 41-42] rappelle la différence existant entre une donnée et une information. Elle décrit l'information comme étant le "résultat d'un processus, obtenu à partir de données dites « brutes », acquises sur un objet, une surface, un phénomène, puis mises en forme, structurées dans une base de données [...], et enfin analysées, exploitées par un utilisateur". De plus, une information est géographique dès lors qu'elle est localisée dans l'espace.

La création d'information est donc le résultat d'une succession de formatages, de structurations, d'analyses puis de mécanismes perceptifs et cognitifs que l'on peut appeler l'interprétation. Ainsi, en cartographie, le traitement des données lors de la création d'une carte ou d'une analyse spatiale génère de l'information pour le cartographe, et la lecture d'une carte ou son utilisation par le biais d'une interface de visualisation va provoquer la création d'information par l'utilisateur

Une **taxonomie** est une classification hiérarchique de concepts.

"L'information extraite à partir des données véhicule la connaissance."
(Encyclopédie Universalis, 1997)

final. C'est cette information qui sera porteuse de la connaissance que le cartographe a présenté ou synthétisé dans sa carte ou que le lecteur a compris lors de l'exploration de la carte via une interface de visualisation.

Les données géographiques sont le noyau du triptyque cartographique existant entre représentations, usages et domaines d'application. En effet, elles sont à la fois la matière première des représentations et le fruit des différents usages qui sont faits de ces mêmes représentations cartographiques : l'analyse ou l'exploration, en particulier, engendrent la création de nouvelles données géographiques qui seront réutilisées à leur tour. Ainsi, pour passer de la donnée à l'information, deux étapes sont nécessaires : la conception d'une représentation par le cartographe et la visualisation de cette représentation par l'utilisateur.

1.2 Panorama de représentations cartographiques mixtes

De par leur accessibilité actuelle et leur diversité, les données spatiales offrent des visions bien différentes du monde réel. À ce titre, elles constituent un matériau de base idéal pour la conception de représentations cartographiques. Tout naturellement, les diffuseurs de données, les cartographes et les utilisateurs sont ainsi tentés d'utiliser ces différentes sources de données et de représentations conjointement pour créer des représentations cartographiques mixtes.

Nous définissons ici une **représentation cartographique mixte** comme étant une représentation cartographique construite à partir de données hétérogènes, qui n'étaient pas destinées initialement à être utilisées conjointement (comme une orthophoto et une base de données cartographique vectorielle par exemple), et potentiellement à partir d'une ou plusieurs représentations cartographiques initialement destinée(s) à être auto-suffisante(s) (comme une carte topographique par exemple).

La conception d'une représentation cartographique mixte implique donc potentiellement la gestion d'incohérences (géométriques, sémantiques, temporelles, de niveau de détail, etc.) entre des données issues de processus d'acquisition différents. De plus, pour concevoir une représentation cartographique mixte, le cartographe ne s'interdit pas de réinjecter comme matériau de base des produits cartographiques sophistiqués (comme des cartes topographiques à grande échelle) car issus de processus de conception complexes (généralisation cartographique, rédaction cartographique, analyse spatiale, etc.).

Dans cette section, nous dressons un panorama de représentations cartographiques mixtes existantes afin d'en cerner la diversité et d'en comprendre les spécificités. Nous nous intéressons successivement à l'utilisation de fonds topographiques au sein de cartes thématiques (Cf. §1.2.1), aux représentations présentant un fond orthophotographique (photocartes et spatiocartes) (Cf. §1.2.2), aux géoportails (Cf. §1.2.3), aux mashups cartographiques (Cf. §1.2.4), aux cartes réalisées à la façon d'un emporte-pièce (Cf. §1.2.5), aux représentations multi-perspectives (Cf. §1.2.6), et aux représentations de réalité mixte (Cf. §1.2.7). Ce panorama nous permet d'identifier certaines limites des méthodes de conception cartographique existantes qui ne sont pas spécifiquement dédiées à la création de représentations cartographiques mixtes. De plus, nous dégageons une tendance commune à cet ensemble varié de représentations (Cf. §1.2.8).

1.2.1 Fond de carte topographique et cartographie thématique

La nature même de ce qu'est un fond de carte en fait un élément fondamental des premières formes de représentations cartographiques mixtes que sont les cartes thématiques.

En effet, selon la définition du Comité Français de Cartographie (CFC), le fond de carte est une « *carte reproduite totalement ou partiellement, en une ou plusieurs couches souvent atténuées, servant de repère pour le report en surcharge de phénomènes localisables déterminés* » [CFC, 1990, p71]. De même, Béguin et Pumain [2010] définissent le fond de carte comme « *l'ensemble des éléments repris de cartes topographiques, utilisés dans une carte thématique comme repérage géographique* ». La fonction première du fond de carte apparaît ainsi comme une aide au repérage dans l'espace géographique permettant à la fois au cartographe de localiser le phénomène qu'il désire représenter, et au lecteur de prendre connaissance du contexte géographique de l'information principale de la carte. En cela, il constitue une couche fondamentale de la carte à laquelle il appartient.

Le fond de carte peut ainsi être décrit par l'ensemble des éléments qui le constituent et qui sont « *indispensables à la structuration et à la validité d'interprétation de l'espace représenté* » [Béguin et Pumain, 2010]. Il apparaît déjà que ces éléments n'ont pas nécessairement à être exhaustifs, mais ils doivent être suffisants à la compréhension de la localisation de la carte. Il n'est pas possible de faire une liste exhaustive ou universelle des éléments constitutifs du fond de carte, d'autant plus que cette liste dépend de la thématique principale de la carte qui utilisera ce fond. On peut néanmoins citer certains éléments très fréquemment utilisés dans le fond de carte par les cartographes : les limites administratives, les réseaux routier et hydrographique, les localités et leur toponymie, la végétation et parfois le relief.

Par ailleurs, le fond de carte est régulièrement défini par opposition à une surcouche qu'il se doit de contextualiser. A titre d'exemple, Béguin et Pumain [2010] commencent par définir et différencier les concepts de « carte topographique » et de « carte thématique » avant de définir ce qu'est le fond de carte par rapport aux éléments thématiques constituant le message principal porté par la carte. La deuxième partie de la définition de fond de carte du CFC va également dans ce sens en le présentant comme une « *image topographique obtenue par un procédé quelconque, et associée à une surcharge obtenue par d'autres procédés pour réaliser une carte.* » [CFC, 1990, p71]. Selon ce point de vue, le CFC décrit cette surcharge comme « *soit non topographique et constituant le thème essentiel de la carte, soit quelconque mais réalisée par d'autres techniques que le fond* » [CFC, 1990, p71]. Dans ce sens, il ne serait pas pertinent de parler de « fond de carte » pour une carte topographique, qui est supposée représenter les éléments du monde réel sans discrimination d'importance a priori, et donc sans thématique principale ni surcouche. Cependant, il peut parfois être difficile de juger si une carte est réellement neutre ou si elle privilégie une thématique parmi d'autres comme par exemple dans le cas des cartes routières : Palsky [1998] rappelle d'ailleurs que « *dès qu'il faut approfondir la définition ou fournir un critère distinctif entre les deux catégories, des difficultés se font jour* ». En effet, la topographie peut être considérée comme une thématique comme une autre et il n'est pas nécessairement évident de déterminer si un thème est topographique.

Une carte thématique est de ce point de vue constituée d'un fond de carte topographique et d'une surcharge thématique. Cette surcharge est ajoutée comme une information complémentaire, à prendre en compte ou à analyser en fonction de son environnement topographique. Ainsi, une carte thématique peut être considérée comme une représentation cartographique mixte, réa-

lisée à partir d'un fond de carte et de données géographiques thématiques n'ayant pas été conçus initialement pour être utilisés conjointement mais que l'on associe visuellement par superposition graphique. Un des premiers exemples de réalisation d'une carte thématique par superposition d'une information thématique sur un fond topographique est la célèbre carte réalisée par John Snow durant l'épidémie de choléra qui frappa le quartier de Soho à Londres en 1854 (Cf. figure 1.9). Cette carte permet d'identifier une des causes de propagation en superposant les cas de décès dus au choléra aux pompes d'eau publique de la ville de Londres.

Palsky [1998] identifie une caractéristique commune aux cartes thématiques permettant leur étude historique : le traitement graphique de l'information thématique est différent de celui des informations topographiques représentées comme information support. Cette caractéristique rejoint la notion de surcharge de la deuxième partie de la définition du CFC citée ci-dessus, qui précise que le fond de carte et la surcharge thématique peuvent être obtenus par des procédés cartographiques différents. De même, notre définition de représentation cartographique mixte sous-entend le recours à des procédés cartographiques différents pour construire une représentation à partir de données hétérogènes. La troisième partie de la définition de fond de carte du CFC ouvre d'ailleurs encore un peu plus la porte à la conception de représentations cartographiques mixtes en définissant le fond de carte comme une « carte utilisée, sans être reproduite, pour servir à la mise en place des éléments d'une nouvelle carte. » [CFC, 1990, p71]. De ce point de vue, une carte thématique est donc une représentation cartographique mixte en cela qu'elle réutilise usuellement un fond de carte topographique sans le retravailler, comme c'est le cas par exemple dans la carte de John Snow illustrée par la figure 1.9.



FIGURE 1.9 : Adaptation de la carte de John Snow de l'épidémie de choléra de 1854³⁹. Les décès sont représentés par des cercles rouges proportionnels au nombre de morts et les pompes à eau par des cercles jaune et noir. Le fond de carte est la représentation de style Toner proposée par l'agence de design Stamen⁴⁰

³⁹Une visualisation interactive de cette adaptation, réalisée par Simon Rogers, est disponible à l'adresse suivante : simonrogers.cartodb.com/tables/john_snow/embed_map?.

⁴⁰La représentation de style toner de l'agence de design Stamen est consultable à l'adresse suivante : maps.stamen.com/toner/.

1.2.2 Photocartes et Spatiocartes

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons aux représentations cartographiques mixtes réalisées à partir d'un fond orthophotographique. Si le fond utilisé est obtenu à partir d'une prise de vue aérienne, cela donne lieu à la réalisation d'une photocarte tandis que si la prise de vue est satellitaire, on parle de spatiocarte. La figure 1.10 présente un exemple de spatiocarte servant de référence lors de l'évaluation des dégâts causés par le passage d'un cyclone.

La plupart des éléments cités au paragraphe précédent pour composer un fond de carte topographique (réseaux routier et hydrographique, villes, végétation) apparaissent dans les images photographiques utilisées dans les photocartes et les spatiocartes. C'est pourquoi ces images peuvent être considérées comme des fonds de représentation cartographique mixte, au même titre que d'autres fonds de carte topographiques. Cependant, l'information contenue dans ces images photographiques n'est pas identifiée graphiquement, ni visuellement saillante ; elle n'est donc pas compréhensible au premier coup d'œil par l'ensemble des lecteurs et rend nécessaire l'ajout d'information vectorielle complémentaire (comme le tracé des routes) ou abstraite (comme les limites administratives ou la toponymie), comme on peut l'observer sur la figure 1.10. Ces données vectorielles peuvent être considérées comme une surcharge au regard du fond orthophotographique auquel elles sont superposées, selon la deuxième définition du fond de carte du CFC, en cela qu'elles sont « réalisées par d'autres techniques que le fond. » [CFC, 1990, p71]. Les photocartes et spatiocartes sont donc des représentations mixtes parce qu'elles contiennent des données hétérogènes et issues de techniques d'acquisition différentes.

Une **orthophoto** est une image aérienne ou satellitaire rectifiée géométriquement afin d'être superposable à une carte (c'est-à-dire selon une projection orthogonale verticale), en prenant en compte les conditions de prise de vue (inclinaison de l'angle de prise de vue, distorsion de l'objectif, etc.) et le relief du terrain.

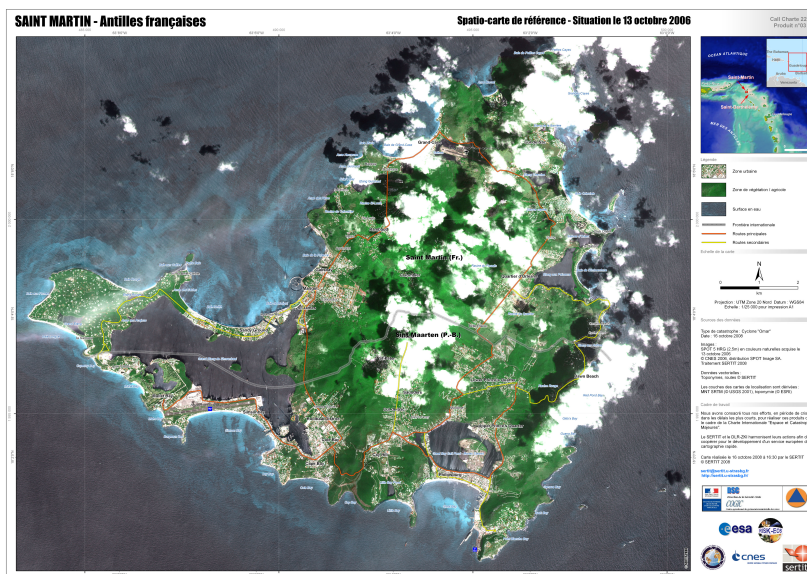


FIGURE 1.10 : Spatiocarte de référence avant le passage du cyclone Omar sur les Antilles françaises en 2008, réalisée par le SERTIT⁴².

1.2.3 Géoportails : porte d'accès aux données spatiales

La multiplication des données géographiques a conduit à la mise en place d'infrastructures de données géographiques (IDG) et de portails de consultation de ces données. Le développement

⁴²Le SERTIT est le SErvice Régional de Traitement d'Image et de Télédétection : sertit.u-strasbg.fr.

de ces sites de consultation des IDG de niveau national a été motivé dans les années 2000 à 2003 par la volonté d'éviter de dupliquer les efforts de production et de diffusion des données spatiales [Crompvoets *et al.*, 2004]. Dans cet esprit, en Europe, la directive Inspire incite les producteurs de données à les rendre consultables selon un schéma de données unifié, dans le but de favoriser l'interopérabilité et le partage de données.

En parallèle, la mise en réseau des moyens informatiques et de stockage par le biais d'Internet a ouvert la porte à la création de services web destinés à diffuser des données, selon un format standardisé et interopérable. Très rapidement, des déclinaisons spatiales de ces services web ont été proposées par l'Open Geospatial Consortium⁴³ (OGC) entre autres, pour diffuser des données géographiques au format vectoriel selon la norme Web Feature Service (WFS) ou au format raster selon la norme Web Map Service (WMS), ou même pour diffuser des traitements de données géographiques selon la norme Web Processing Service (WPS).

Plusieurs possibilités s'offrent donc à un producteur de données ou à un gestionnaire d'IDG pour diffuser des données. Il est possible de les proposer en téléchargement, de les rendre accessibles sous la forme de service web ou encore de permettre leur consultation par le biais d'une interface de visualisation cartographique. Ces options ne sont d'ailleurs pas exclusives puisqu'une interface de visualisation cartographique peut être construite en utilisant une bibliothèque logicielle (aussi appelée API pour application programming interface) capable de lire et d'intégrer des service web de diffusion de données spatiales. A ce propos, Crompvoets *et al.* [2004] identifient dès 2003 que non seulement les interfaces de recherche de données basées sur une représentation cartographique sont très fréquentes parmi les sites d'accès à une IDG, mais aussi que l'existence d'une interface de visualisation cartographique des résultats utilisant des services web est un facteur significatif d'augmentation de la fréquentation de ces sites web.

Ainsi, les sites internet destinés à être des points d'entrée de consultation et d'exploration d'une IDG sous la forme d'une interface de visualisation cartographique se sont multipliés et ont été appelés "géoportail". Un géoportail est une interface de visualisation permettant la recherche et la consultation de données spatiales sous la forme d'une carte interactive, parfois associée à un géocatalogue, interface de recherche de données par leurs métadonnées.

Un **service web** est une technologie permettant la communication entre applications et sites web par le biais de protocoles d'échange et de formats de données standardisés.

Une **métadonnée** est une information sur la donnée, comme par exemple sa date d'acquisition ou sa précision géométrique.

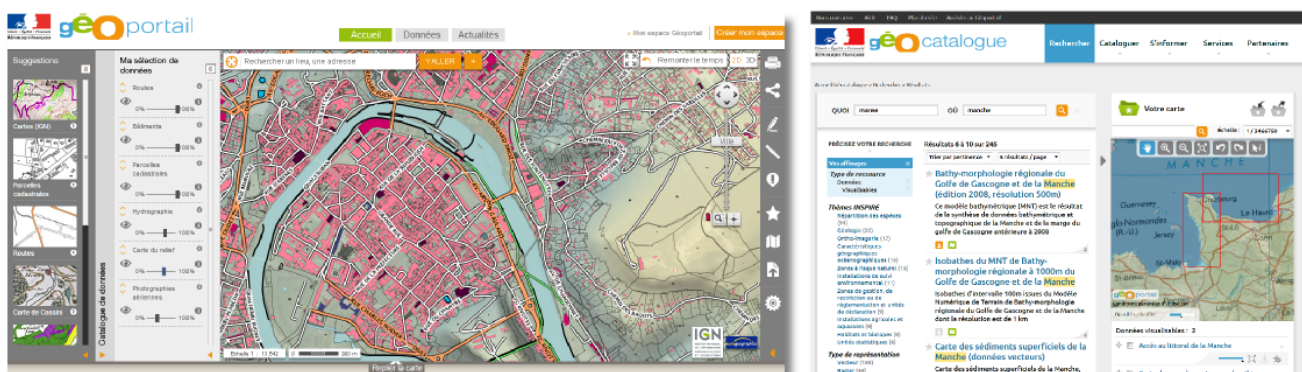


FIGURE 1.11 : Le Géoportail de l'IGN, associé au GéoCatalogue du BRGM.

Les données spatiales disponibles sur le Géoportail⁴⁴ et le GéoCatalogue⁴⁵ sont diffusées

⁴³ Les normes de l'OGC sont disponibles à l'adresse suivante : www.opengeospatial.org.

⁴⁴ Le Géoportail de l'IGN est consultable à l'adresse suivante : www.gouv.geoportail.fr

⁴⁵ Le GéoCatalogue du BRGM est consultable à l'adresse suivante : www.geo catalogue.fr

par des services web sous la forme de flux de données au format WMS, c'est-à-dire au format raster. Le Géoportail propose une visualisation cartographique de ces flux de données grâce aux fonctionnalités de l'API cartographique OpenLayers⁴⁶, tandis que le Géocatalogue permet un accès aux données par le biais de requêtes spatiales et attributaires sur les métadonnées liées à ces flux de données (Cf. figure 1.11). Ces deux éléments sont interconnectés et forment une IDG du territoire national français.

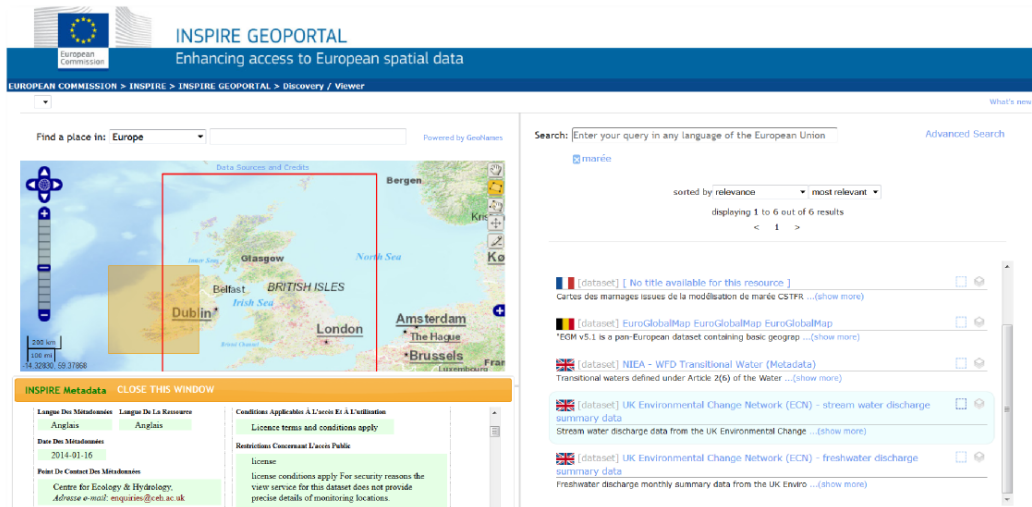


FIGURE 1.12 : Le géoportail Inspire

Le géoportail Inspire⁴⁷ propose des fonctionnalités similaires de recherche et de consultation de données spatiales dans une IDG du territoire européen (Cf. figure 1.12).

Les géoportails mettent donc à disposition différentes données géographiques par le biais d'une interface de visualisation cartographique. Les données disponibles sont superposées sous la forme d'un empilement de couches et peuvent être d'origine vectorielle ou raster. A titre d'exemple, sur la figure 1.11, la représentation cartographique a été obtenue par superposition de données topographiques (routes, bâtiments, hydrographie, relief), cadastrales et orthophotographiques.

Les géoportails permettent donc de visualiser des représentations cartographiques mixtes réalisées par superposition de couches de données hétérogènes et qui n'étaient initialement pas conçues pour être superposées. Lorsque l'on visualise des couches de données sur un géoportail, la notion de fond de carte est mise à mal de plusieurs façons. En effet, il est parfois difficile d'identifier une couche de référence parmi celles qui sont affichées, comme par exemple entre une carte topographique et une carte marine si l'on se trouve en zone littorale. De plus, la superposition par transparence de plusieurs fonds raster crée un mélange visuel de plusieurs couches qu'il est délicat de considérer comme un fond de carte, du fait du manque de lisibilité de la représentation cartographique résultante qui ne peut plus être considérée comme autosuffisante.

Enfin, il est intéressant de noter que dans le cas des géoportails, les représentations mixtes sont créées par l'utilisateur qui choisit les couches qu'il souhaite afficher et l'ordre dans lequel il souhaite les visualiser. Cela modifie à nouveau le rapport entre le cartographe et l'utilisateur final des données. En effet, le cartographe est amené à choisir une symbolisation par défaut des

⁴⁶L'API cartographique OpenLayers est accessible à l'adresse suivante : openlayers.org.

⁴⁷Le Géoportail Inspire est consultable à l'adresse suivante : <http://inspire-geoportal.ec.europa.eu>

couches qu'il souhaite mettre à disposition sous la forme de flux de données, sans savoir comment elles seront visualisées par l'utilisateur (ni avec quelles autres couches, ni dans quel ordre). L'utilisateur quant à lui devra construire sa propre représentation cartographique mixte en utilisant des données dont il n'aura la plupart du temps pas l'opportunité de modifier la symbolisation. Pour faciliter ce transfert de décision de symbolisation, une fonctionnalité intéressante a récemment été ajoutée au Géoportail de l'IGN : il est désormais possible de passer chaque couche en niveau de gris, ce qui facilite la combinaison de couches qui auraient été symbolisées par défaut avec des couleurs incompatibles.

1.2.4 Mashups : intégration de données utilisateur

Un mashup est une application composite, agrégeant des services et des sources de données issus de différents sites de ressources sur internet. A titre d'exemple, le site Netvibes⁴⁸ peut être utilisé pour agréger des flux d'informations de type RSS, ou pour créer un tableau de bord présentant simultanément l'activité d'une personne sur différents réseaux sociaux.

Les mashups cartographiques font appel à plusieurs sources de données spatiales ou de services web géographiques. Les mashups cartographiques proposent donc par définition une représentation mixte à consulter. Ils sont généralement conçus en utilisant une API cartographique, c'est-à-dire une bibliothèque logicielle fournissant des méthodes pour afficher une carte interactive dans une page web. Il existe de nombreuses API cartographiques, comme par exemple l'API OpenLayers⁵⁴, l'API GoogleMaps⁵⁵, Leaflet⁵⁶, ModestMap⁵⁷, l'API du Géoportail⁵⁸, etc., qui proposent différentes méthodes pour configurer la carte (zoom, centrage, etc.) ou ajouter des outils interactifs à la carte (calcul de distance ou d'itinéraire).

De plus, toutes les API cartographiques fournissent des méthodes pour ajouter des couches de données à la carte, et parfois pour les styliser. Ces données spatiales peuvent être stockées sur le serveur internet hébergeant le mashup ou reçues sous la forme de flux de données lorsque l'API cartographique fournit des fonctionnalités de lecture de services web (WMS, WFS, etc.). Le concepteur d'un mashup peut ainsi construire une représentation cartographique mixte en faisant appel à des services web issus de différents producteurs de données et en utilisant ses propres données.

La figure 1.13 présente un exemple de mashup cartographique, le site Utagawa qui fédère une communauté de VTTistes. Ce mashup fait appel à plusieurs fournisseurs de fonds de carte (OpenStreetMap³⁴, GoogleMaps³⁵, IGN) et de données raster d'ombrage cartographique (NASA), et affiche également les itinéraires de randonnées VTT créés par la communauté, associés à des informations sur le parcours.

⁴⁸Le site web Netvibes est accessible à l'adresse suivante : www.netvibes.com. Le lecteur pourra consulter un exemple de tableau de bord regroupant les pérégrinations cartographiques ayant contribué à la veille technologique et bibliographique de notre travail de thèse, sur les réseaux sociaux CiteULike⁴⁹, Twitter⁵⁰, SlideShare⁵¹, SourceForge⁵² et Scoop-it⁵³, à l'adresse suivante : <http://www.netvibes.com/carthoarau#Cartographie>.

⁴⁹Le réseau social bibliographique CiteULike est accessible à l'adresse suivante : www.citeulike.org.

⁵⁰Le réseau social de micro-messagerie Twitter est accessible à l'adresse suivante : twitter.com.

⁵¹Le réseau de partage de présentations SlideShare est accessible à l'adresse suivante : fr.slideshare.net.

⁵²La communauté OpenSource SourceForge est accessible à l'adresse suivante : sourceforge.net.

⁵³Le réseau social de partage d'informations SlideShare est accessible à l'adresse suivante : www.scoop.it.

⁵⁴L'API cartographique OpenLayers est accessible à l'adresse suivante : openlayers.org.

⁵⁵Les APIs cartographiques de GoogleMaps sont accessibles à l'adresse suivante : developers.google.com/maps/.

⁵⁶L'API cartographique Leaflet est accessible à l'adresse suivante : leafletjs.com.

⁵⁷L'API cartographique Modest Map est accessible à l'adresse suivante : modestmaps.com.

⁵⁸L'API cartographique du Géoportail est accessible à l'adresse suivante : api.ign.fr.

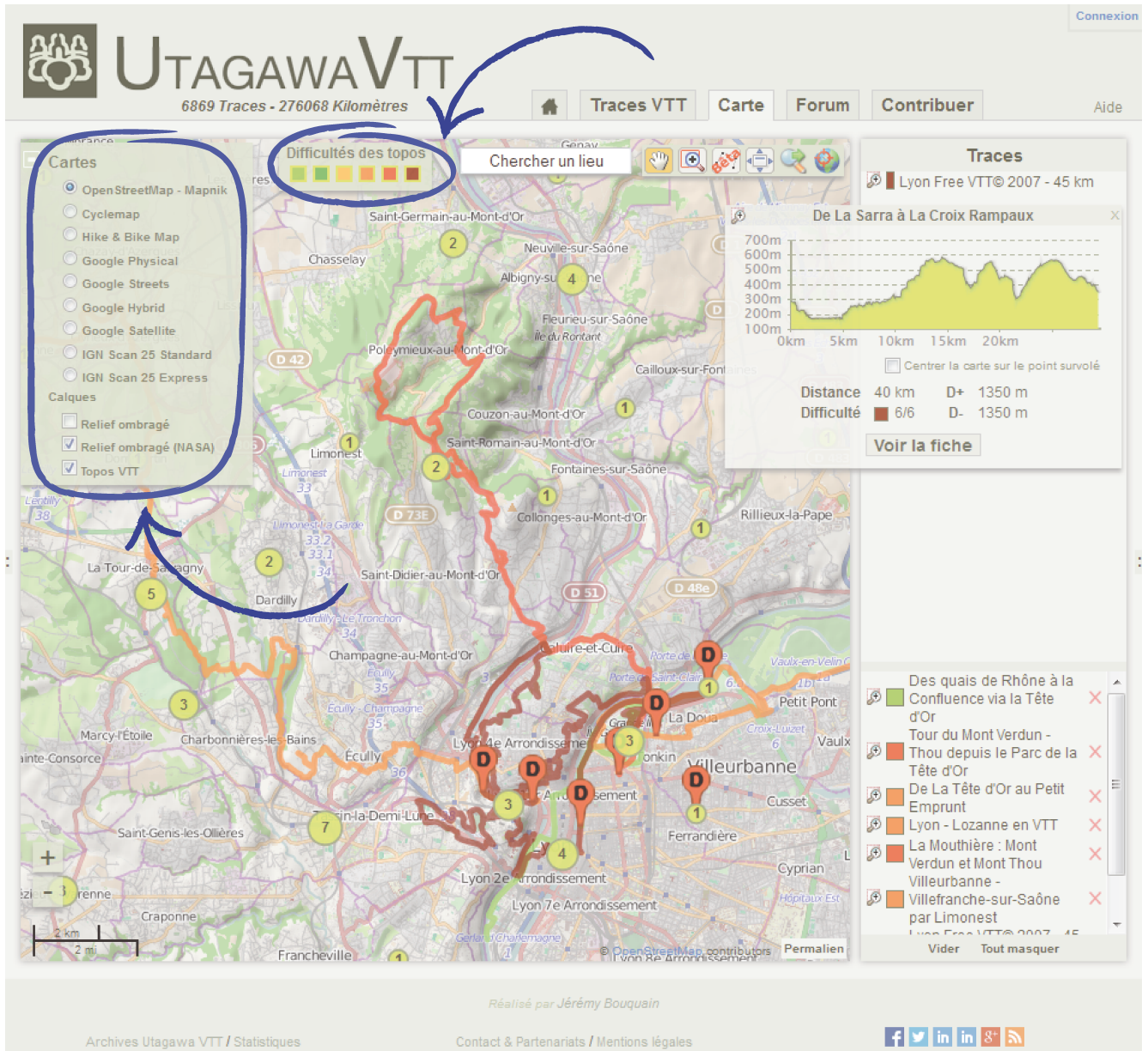


FIGURE 1.13 : Utagawa⁵⁹, un site communautaire de passionnés de randonnées VTT.

La figure 1.13 illustre également certaines difficultés qui se présentent lors de la création d'une application cartographique sur le modèle de mashup. Le concepteur de la représentation cartographique choisit les couches qui seront visualisables mais ne maîtrise pas toujours leur symbolisation selon le type de service web et des potentialités de l'API cartographique qu'il utilise, ou leur niveau de généralisation cartographique. Le parti pris du site Utagawa est de permettre la visualisation d'un seul fond de carte à la fois. Cependant, il est également possible d'ajouter un ombrage, indépendamment du fond de carte sélectionné. En conséquence, rien n'empêche l'utilisateur de superposer la couche d'ombrage et un fond de carte qui en contient déjà un.

De plus, le fait de permettre à l'utilisateur d'ajouter ses propres données implique de définir

⁵⁹Le site communautaire de VTTistes Utagawa est accessible à l'adresse suivante : www.utagawavtt.com

une symbolisation par défaut pour ces données, qui ne sera pas facile à définir sans savoir quel fond de carte sera utilisé pour visualiser les traces, ni à quelle échelle de visualisation. Le parti pris du site Utagawa est de symboliser les traces GPS des membres de la communauté en utilisant une information qualitative sur la difficulté des traces, indépendamment du fond de carte. La lisibilité des ces itinéraires ne sera donc pas toujours garantie.

1.2.5 Cartes à l'emporte-pièce

Les représentations cartographiques construites lors de la visualisation d'un géoportail ou d'une application de mashup sont le résultat d'un empilement de couches de données géographiques. L'utilisateur peut y choisir les données qu'il souhaite visualiser sur l'ensemble de la représentation.

Les données tuilées sont des images qui ont été pré-découpées et stockées sous la forme de tuiles (petites images carrées) formant une pyramide pour les différentes échelles disponibles. Ce type de données est diffusé par le biais de service web selon la norme WMTS. La plupart des applications cartographiques interactives (comme Google Maps ou OSM) utilise ce type de service web dans le but de minimiser la taille de l'information qui transite par le réseau et d'optimiser la fluidité d'affichage.

Suite aux avancées technologiques récentes (moteurs de rendus avancés, outils de créations et de gestions de données tuilées, etc.), les cartographes proposent depuis peu des représentations mixtes construites à la façon d'un patchwork de représentations cartographiques pré-existantes. Les représentations ne sont plus superposées pour en former une nouvelle, elles sont découpées, comme à l'emporte-pièce, pour faire apparaître différentes représentations au sein de la visualisation. Ce découpage peut être stratégique, aléatoire ou dynamique, comme l'illustrent les trois exemples de la figure 1.14 :

- L'image de gauche de la figure 1.14 présente une représentation récente des rues issue de GoogleMaps et une représentation ancienne des îlots urbains issue d'un plan cadastral historique. Cette représentation est donc mixte à la fois graphiquement et temporellement. Le cartographe choisit ici localement quelle représentation il souhaite afficher.
- L'image centrale de la figure 1.14 présente un exemple de représentation aléatoirement mixte. Cette représentation tire profit de la norme Web Map Tile Service et du format de données tuilé. Chaque tuile y est choisie aléatoirement parmi un ensemble d'images tuilées ; on peut voir des tuiles provenant de la carte classique d'OpenStreetMap²⁴, des cartes aquarelle et toner de Stamen⁶⁰ ou de différentes cartes stylisées avec l'application CloudMade⁶¹.
- L'image de droite de la figure 1.14 présente une représentation métaphorique (et presque prophétique) de la montée des eaux dans la baie de San Francisco⁶². Les terres émergées sont représentées par la carte toner de Stamen, tandis que les terres immergées et la mer de faible profondeur sont représentées par une portion d'orthophotographie, et la haute mer est représentée par des vagues stylisées. L'utilisateur peut simuler la montée des eaux due au réchauffement climatique grâce à un curseur qui déclenche une " inondation " de la carte toner par extension de la portion orthophotographique. Le découpage des représentations est dynamique et basé sur des zones géographiques prédéfinies par rapport à un phénomène géographique donné.

⁶⁰L'agence de design Stamen propose des représentations cartographiques artistiques à partir des données OSM²³ à l'adresse suivante : maps.stamen.com

⁶¹CloudMade proposait un éditeur de style pour créer une carte personnalisée à partir de données OSM.

⁶²Le site Surging Sea propose de simuler la montée des eaux pour différentes villes des Etats-Unis, à l'adresse suivante : <http://sealevel.climatecentral.org/>.

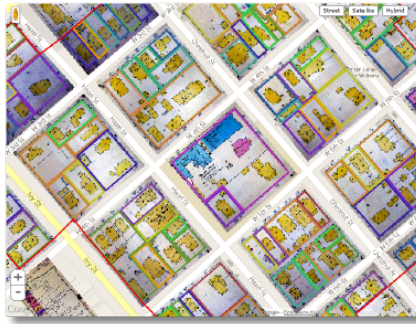
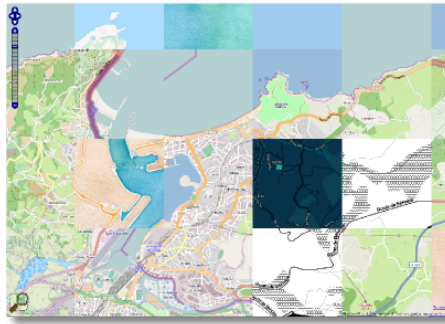
Découpage spatio-temporel**Combinaison de tuiles****Simulation**

FIGURE 1.14 : Patchworks de représentations cartographiques. À gauche, extrait de la carte du *Chico Historical GIS*⁶⁶. Au centre, extrait de la carte *Open What Ever Map*⁶⁷. À droite, extrait de la carte de San Francisco sur le site *Surging Sea*⁶⁸.

1.2.6 Représentations cartographiques multi-perspectives

L'intégration de plusieurs perspectives ou points de vue peut également mener à la conception de représentations cartographiques mixtes. Ces représentations présentent différents points de vue sur une même scène au sein d'une même représentation, elles sont donc mixtes en termes de projection cartographique. Pour permettre cela, les travaux actuels visent à déformer géométriquement les différentes représentations pour faire apparaître des zones qui n'auraient pas été visibles depuis un même point de vue dans la réalité, tout en minimisant l'altération des représentations initiales.

D'une part, la représentation d'un territoire nécessite parfois de déformer le paysage afin de donner plus de place à une zone prioritaire. Par exemple, *Jenny et al. [2011b]* proposent une méthode interactive permettant de déformer un modèle numérique de terrain dans le but de créer un panorama de montagne ou un plan des pistes (Cf. figure 1.15).

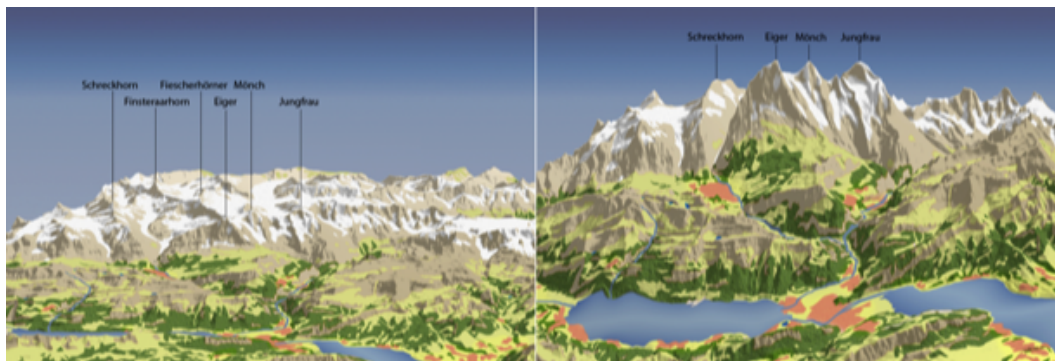


FIGURE 1.15 : Déformation interactive du relief par *Jenny et al. [2011b]*.

D'autre part, pour aider à visualiser ou analyser un parcours, le paysage peut être déformé pour créer des vues panoramiques le long d'un itinéraire (Cf. figure 1.16). Dans cet esprit, *Jenny*

⁶⁶La carte du *Chico Historical GIS* est consultable à l'adresse suivante : www.csuchico.edu/chicohistoricalgis/map.html.

⁶⁷La carte *Open What Ever Map* est consultable à l'adresse suivante : www.openwhatevermap.org.

⁶⁸La carte de San Francisco sur le site *Surging Sea* est consultable à l'adresse suivante : ss2climatecentral.org/#13/37.78/-122.43.

et al. [2011a] s'intéressent à la visualisation d'un itinéraire de randonnée, *Fund* [2012] entend créer des représentations de profils urbains pour aider à l'aménagement de la ville, *Agarwala et al.* [2006] s'attachent à la création de longues scènes photographiques en utilisant des panoramas multi-vues et *Grabler et al.* [2008] proposent une méthode d'orientation des faces de bâtiments selon différentes perspectives pour aider l'utilisateur à se repérer le long d'un itinéraire urbain.

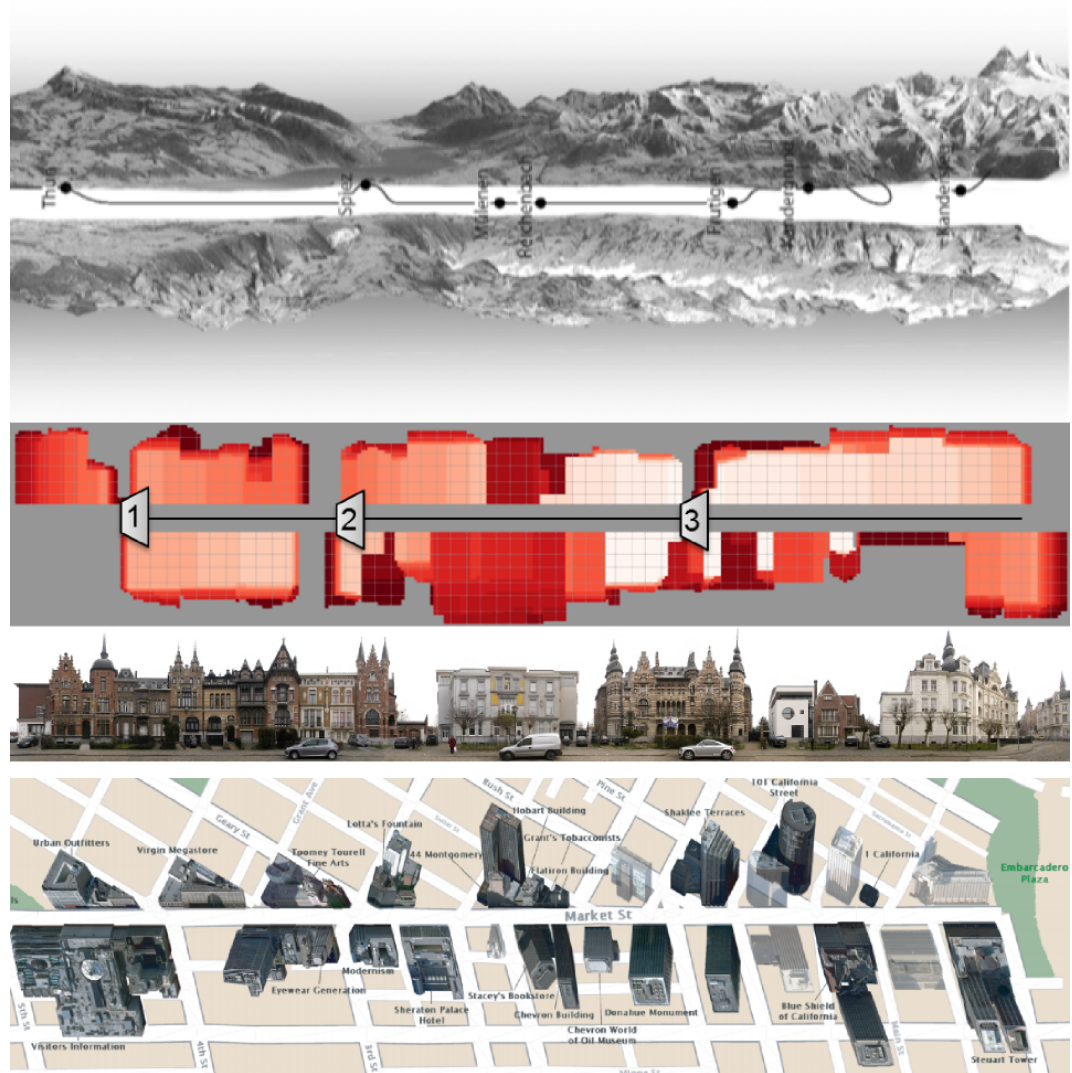


FIGURE 1.16 : Déformations pour la création de vues panoramiques : suivant un itinéraire par *Jenny et al.* [2011a], pour créer un profil urbain par *Fund* [2012], pour créer de longues scènes photographiques par *Agarwala et al.* [2006], et le long d'un itinéraire urbain par *Grabler et al.* [2008].

Enfin, différents travaux s'intéressent à la conception de méthodes de projection progressive. L'objectif de cette approche est de proposer une vision mixte de la réalité à l'utilisateur, en maximisant la représentation des zones locales tout en présentant une information de contexte à l'utilisateur. Dans ce sens, plusieurs travaux permettent la conception d'une représentation pour simuler une vue d'oiseau ou pour créer une vue piéton augmentée par une information contextuelle représentée au-dessus de l'horizon. Cette approche est aussi bien appliquée à la

visualisation de photographies combinées [Lieng *et al.*, 2012] ou à la création de dessins animés [Wood *et al.*, 1997], qu'à la visualisation cartographique [Jenny *et al.*, 2010c; Pasewaldt *et al.*, 2011, 2014] (Cf. figure 1.17).

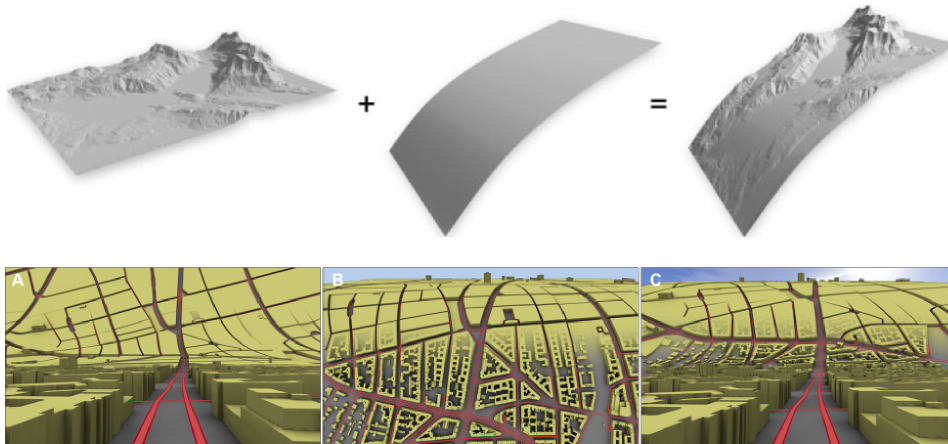


FIGURE 1.17 : Visualisation cartographique intégrant une projection progressive, par Jenny *et al.* [2010c] et Pasewaldt *et al.* [2011, 2014].

Ces travaux amorcent la conception de représentations mixtes en 3D. Pour permettre la conception de représentations mixtes en terme de stylisation, Aubry *et al.* [2014] développent une méthode d'alignement entre un modèle 3D et des peintures de maîtres, qui constitue un pas de plus vers le mélange visuel de représentations cartographiques sous différents points de vue et de différents styles artistiques.

1.2.7 Réalité augmentée et réalité virtuelle

La miniaturisation des systèmes de positionnement et des capteurs numériques d'images et de vidéos, a rendu possible l'émergence d'un nouveau type de représentations mixtes : les **réalités mixtes** intégrant des éléments réels ou virtuels à des environnements eux-mêmes réels ou virtuels [Milgram et Kishino, 1994]. Les auteurs définissent une taxonomie des différents intermédiaires (réalité augmentée, virtualité augmentée) existants entre l'environnement réel et l'environnement virtuel formant ce qu'ils appellent un **continuum de virtualité** ("*virtuality continuum*") selon la proportion de réalité et de virtualité des éléments intégrés et de l'environnement de support (Cf. figure 1.18). Les états intermédiaires sont illustrés à la figure 1.19, mais il convient tout d'abord de définir ces différents types de réalité mixte, de la plus virtuelle à la plus réelle.

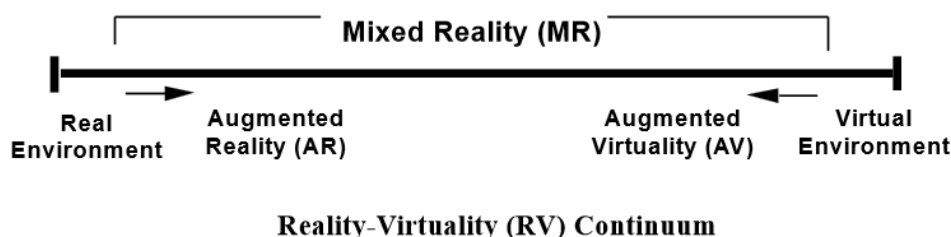


FIGURE 1.18 : Continuum de réalité et de virtualité, d'après Milgram et Kishino [1994].

La **réalité virtuelle** est un concept introduit par Jaron Lanier et théorisé par Bryson [1996] qui la définit comme « *un nouveau type d'interface utilisant des ordinateurs et une IHM pour créer l'impression de monde 3D dans lequel l'utilisateur peut interagir directement avec les objets virtuels.* » La réalité virtuelle n'intègre aucun élément du monde : elle est entièrement générée par ordinateur et généralement proposée sous la forme de dispositifs interactifs et souvent immersifs.

La **virtualité augmentée**, définie par Milgram et Kishino [1994], consiste à intégrer des objets ou des personnages réels, des personnages filmés ou des photographies du monde réel par exemple, dans un monde virtuel. Elle constitue un exemple intéressant de représentation mixte en cela qu'elle combine des éléments de différents degrés de virtualité et de réalité, qui se doivent d'être compatibles et cohérents et peuvent être amenés à interagir entre eux.

La **réalité augmentée** est communément définie comme « *tout environnement réel qui a été « augmenté » par l'incrustation d'objets virtuels* » selon Milgram et Kishino [1994] et présentée par Schmalstieg et Reitmayr [2007] comme « *un paradigme radicalement nouveau d'interface utilisateur, visant à amplifier la perception sensorielle de l'utilisateur en ajoutant directement des informations, générées par ordinateur, généralement visuelles* ». Azuma [1997] identifie trois caractéristiques principales à la réalité augmentée : la combinaison de réel et virtuel, l'interactivité en temps réel, et la modélisation en 3D. C'est la première de ces trois caractéristiques qui nous invite à nous intéresser aux applications de réalité augmentée en tant que représentation mixte.

Contrairement à la réalité augmentée qui se présente comme une réalité enrichie, la **réalité diminuée** est présentée par Herling et Broll [2010] comme une représentation de la réalité à laquelle certains éléments ont été retirés, comme par exemple le bruit de fond d'un enregistrement sonore ou les imperfections dans les logiciels de retouche photo. Le principe de réalité diminuée n'est pas initialement prévu au sein du continuum de Milgram et Kishino [1994] mais il pourrait être intéressant dans la conception de représentations cartographiques mixtes, dans le but de supprimer de l'information redondante entre les représentations agrégées ou de simplifier des représentations trop complexes pour être fusionnées.

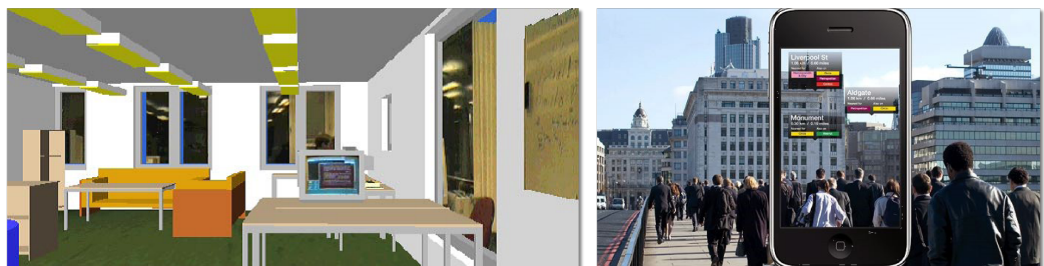


FIGURE 1.19 : Exemple d'application de virtualité augmentée dans lequel des photos de fenêtres et d'écran d'ordinateur ont été intégrées dans une scène virtuelle, à gauche, d'après Simsarian et Akesson [1997]. Exemple d'application de réalité augmentée dans lequel des informations sur les métros proches sont ajoutées en temps réel à la vidéo capturée par un smartphone, à droite, d'après Acrossair [2011].

Hugues *et al.* [2011] identifient deux types d'applications de réalité augmentée particulièrement liées à l'information spatialisée et à sa représentation : la cartographie augmentée et le territoire augmenté. La cartographie augmentée consiste à ajouter des informations complémentaires à une carte, tandis que le territoire augmenté présente une vue du monde réel souvent géolocalisée au sein de laquelle des informations virtuelles, souvent vectorielles et géographiques,

ont été ajoutées. La figure 1.20 illustre chacun de ces types d'application.



FIGURE 1.20 : Exemples d'applications de cartographie augmentée pour l'aide à l'évacuation, à gauche d'après [Reitmayr et al. \[2005\]](#), et de territoire augmenté pour identifier les sommets, à droite d'après [PeakAR \[2011\]](#).

En tant que représentations mixtes, les applications de réalité augmentée sont conçues à partir de données de fond destinées à représenter la réalité perçue par l'utilisateur, et de données complémentaires utiles pour un usage donné. Les données de fond utilisées dans des applications de réalité augmentée peuvent être des photographies du monde réel [[Gonzato et al., 2008](#); [Boer et al., 2008](#); [Karsch et al., 2011](#)], des vidéos [[Schmalstieg et Reitmayr, 2005](#); [PeakAR, 2011](#); [Hugues et al., 2010](#); [Portalés et al., 2010](#); [Mower, 2009](#)] ou des cartes papier [[Reitmayr et al., 2005](#)]. Paradoxalement, ces données de fond sont considérées à la fois comme une référence attestant du monde réel et comme une représentation lacunaire à laquelle il est nécessaire d'ajouter des informations complémentaires sous la forme d'une surcouche le plus souvent vectorielle.

Comme dans le cas des cartes thématiques, il n'est pas toujours facile d'établir la limite entre données de fond et données complémentaires. Cette limite dépend de l'application visée et du niveau de détail de la représentation mixte globale. Cependant, dans le cas de la réalité augmentée, un aspect qui pourra guider la distinction entre données de fond et données complémentaires sera leur degré de réalisme et d'abstraction. En effet, pour pouvoir servir de fond à une application de réalité augmentée, une donnée devra être la plus fidèle possible à la perception du monde réel par l'utilisateur. A contrario, une information abstraite et potentiellement difficile à acquérir (car qualitative, ou non matérielle par exemple) aura plutôt vocation à être vue comme complémentaire à une représentation plus réaliste du monde réel au sein d'une application de réalité augmentée.

Ce panorama démontre le fort potentiel engendré par le mélange de données et de représentations hétérogènes et complémentaires au sein d'une même représentation. En effet, ce principe permet de sélectionner dans les représentations combinées les données utiles à l'utilisateur, et de maximiser l'information transmise par la représentation mixte résultante. Les propositions pour relever ce défi d'utilisation conjointe de données ou de représentations hétérogènes se concentrent surtout sur la résolution des aspects géométriques. Il existe peu de suggestions graphiques visant à réconcilier ou rapprocher visuellement les représentations combinées.

1.2.8 Un premier constat : une utilisation croissante de fonds orthophotographiques

Le panorama établi au paragraphe précédent permet d'illustrer une grande variété de représentations cartographiques. Une tendance fédératrice ressort également dans la conception de ce type de représentation cartographique : il apparaît clairement que les fonds orthophotographiques sont de plus en plus utilisés dans les représentations cartographiques. Nous identifions dans ce paragraphe les raisons sous-jacentes à cette tendance récente et à l'utilisation qui est faite des représentations résultantes.

Pourquoi ? La première raison évidente de l'utilisation actuelle de fonds orthophotographiques est **l'existence et la disponibilité** de ce type de données. Au début du vingtième siècle, les prémices de la photographie aérienne et de la photogrammétrie sont marquées par l'utilisation de divers dispositifs volants (ballons, cerf-volants, montgolfières, etc) ou même d'oiseaux (Julius Neubronner fait breveter dès 1906 un système de photographie vue du ciel grâce à des pigeons photographes), et par un développement technologique tributaire des besoins de renseignements durant les deux guerres mondiales. Depuis, les instituts producteurs de données tels que l'IGN disposent des moyens nécessaires pour couvrir les territoires nationaux par des prises de vues aériennes. De plus, depuis la mise en orbite de satellites d'observation de la Terre dans les années soixante-dix, des couvertures mondiales d'images satellite sont également réalisées dans un but d'inventaire et d'analyse, partout sur la surface du globe.

Des données orthophotographiques existent donc depuis environ soixante-dix ans. Elles sont utilisées en premier lieu pour la réalisation de spatio-cartes et de photo-cartes (Cf. §1.2.2). Dans la continuité de l'apparition du réseau Internet et des services web de diffusion de l'information, le service de cartographie en ligne GoogleMaps fait figure de pionnier en proposant dès juillet 2005 la consultation d'un fond orthophotographique mondial par le biais de son interface de visualisation cartographique. Les autres portails et services de cartographie en ligne suivront rapidement étant donné le succès rencontré auprès du grand public par ce nouveau type de représentation, en diffusant leur fond orthophotographique sous la forme de services web et en les rendant accessibles dans leurs interfaces cartographiques.

Une autre raison invitant à l'utilisation de données orthophotographiques réalisées à partir d'images satellite est **la rapidité d'acquisition** de ce type de données géographiques. En effet, étant donné son éloignement de la surface de la Terre, un satellite d'observation est capable de couvrir rapidement une grande portion de la Terre. Les satellites les plus récents peuvent même parfois être inclinés ou déroutés pour couvrir rapidement une zone donnée. Cette rapidité d'acquisition est bien entendu un atout important en situation de crise ou de catastrophe naturelle. La Charte internationale "Espace et catastrophes majeures"⁶⁹ a ainsi été mise en place pour déclencher l'acquisition expresse d'images satellite suite à une catastrophe majeure.

Un premier corollaire à la rapidité d'acquisition d'images satellite est leur **faible coût de réalisation**, comparé à une prise de vue aérienne classique ou à une carte topographique. Ce faible coût d'acquisition a par conséquent été un facteur déterminant pour la création de spatio-cartes dès l'apparition des images satellite afin de réaliser des représentations cartographiques de lieux non encore cartographiés par l'Homme. Ces spatiocartes constituaient alors un produit

⁶⁹Le site de la charte internationale "Espace et catastrophes majeures" est disponible à l'adresse suivante : www.disasterscharter.org.

cartographique peu onéreux et fournissant plus d'information que les données cartographiques encore inexistantes dans certains pays.

Un deuxième corollaire à la rapidité d'acquisition d'images satellite est leur **actualité**. Elles constituent parfois l'information la plus à jour sur un territoire donné. Le système Pléiades⁷⁰ permet par exemple un accès journalier sur un territoire donné. Le cartographe va donc parfois utiliser un fond orthophotographique lorsqu'il a besoin de créer une représentation d'une grande actualité, comme en situation de crise humanitaire ou environnementale.

Enfin, une dernière raison qui peut inciter le cartographe à utiliser un fond orthophotographique est le fait qu'il fournit une représentation continue et exhaustive du territoire. Le cartographe peut ainsi espérer que le lecteur de sa représentation cartographique sera en capacité de repérer par photointerprétation d'éventuelles informations topographiques manquantes dans les données de surcouche.

Pour quoi faire ? L'accessibilité croissante des données orthophotographiques a conduit à leur utilisation au sein de représentations cartographiques et d'applications de géovisualisation diverses dont nous dressons un inventaire dans cette section.

On retrouve tout d'abord des fonds orthophotographiques dans des **applications ou représentations destinées au grand public** sur lesquels le concepteur a simplement superposé une information qu'il souhaite mettre en valeur sur un fond rapide à réaliser. La figure 1.21 présente deux exemples où des informations environnementales (le passage d'un cyclone, et le niveau de pollution) ont été mises en valeur par l'utilisation de couleurs vives sur un fond orthophotographique uniquement présent pour localiser et contextualiser l'environnement du phénomène représenté.

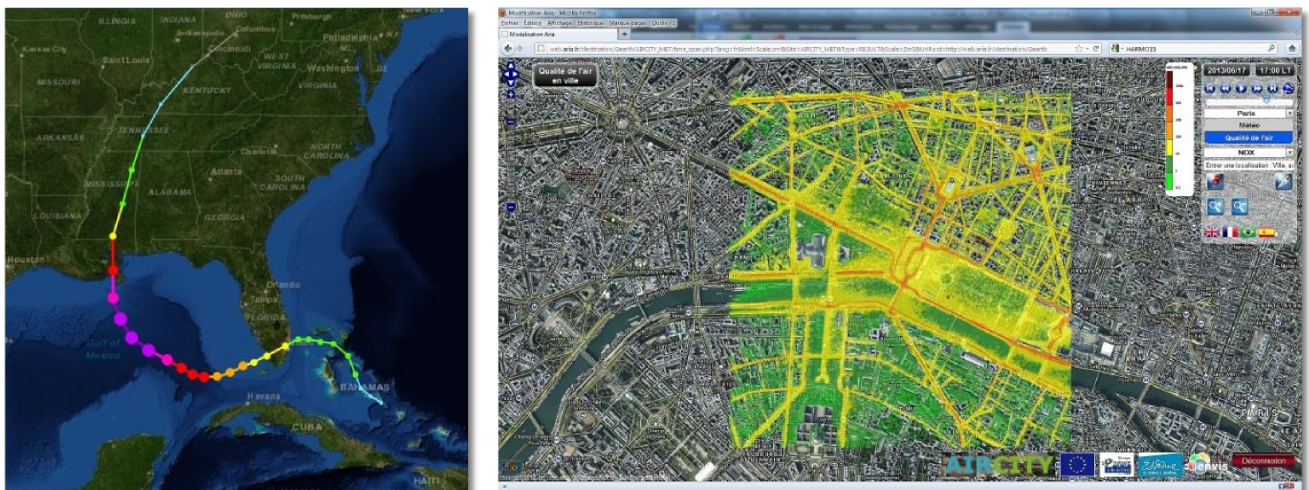


FIGURE 1.21 : Utilisation de fond orthophotographique pour superposer des informations complémentaires vectorielles : la trajectoire et l'intensité de l'ouragan Katrina de 2005⁷³ à gauche ; et la pollution de l'air à Paris lors d'un pic de pollution⁷⁴ à droite.

⁷⁰Le site internet du système Pléiades est accessible à l'adresse suivante : smc.cnes.fr/PLEIADES.

⁷³Les traces des dix plus importants ouragans recensés sont visualisables à l'adresse suivante : <http://storymaps.esri.com/stories/2012/top-ten-hurricanes/>.

⁷⁴L'association AirParif publie quotidiennement des cartes de pollution à l'adresse suivante : <http://www.airparif.asso.fr/>.

La **télédétection** est l'ensemble des méthodes de traitement des images acquises par les satellites d'observation de la Terre.

Il existe d'autres **types de représentations plus spécialisées** qui utilisent des fonds orthophotographiques. On peut noter par exemple la représentation de la figure 1.22 où des résultats d'analyse de *télédétection* sont présentés par Gressin *et al.* [2014] en superposition de l'orthophoto utilisée pour réaliser ces analyses. Cette figure regroupe donc des données hétérogènes en termes de type de géométrie (raster/vecteur), de niveau d'analyse (données brutes / résultats interprétés) et de temporalité; elle constitue un exemple intéressant de représentation cartographique mixte destinée à un public spécialisé.

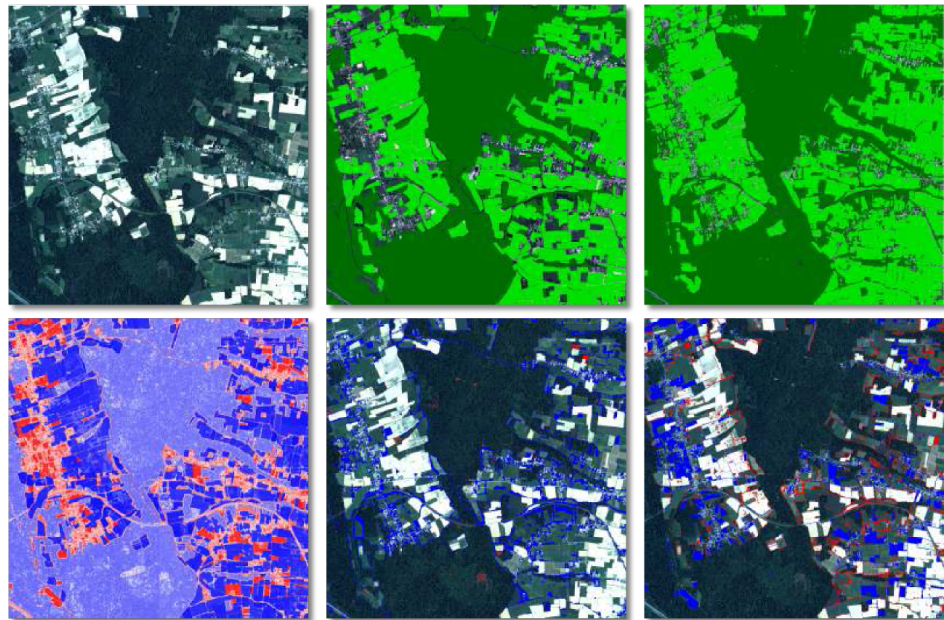


FIGURE 1.22 : Exemple de résultats de travaux de télédétection pour l'étude du changement. Image d'origine, comparaison de plusieurs méthodes de classification de l'occupation du sol (champs et forêts), carte de probabilité de changement, et changements détectés entre les différentes classifications, d'après Gressin *et al.* [2014].

Les fonds orthophotographiques sont également utilisés dans des **applications d'aide à la saisie** d'objets géographiques. Ces applications peuvent être destinées à créer des données absentes des cartes topographiques, comme c'est le cas ici dans l'application Telepac (Cf fig. 1.23, à droite) mise en place par le ministère de l'agriculture pour permettre aux agriculteurs de saisir le contour de leurs parcelles agricoles afin de bénéficier des subventions de la Politique Agricole Commune (PAC) de l'Union Européenne. Ce mode de saisie de nouvelles données est également disponible actuellement dans les outils dédiés à la saisie collaborative du projet OpenStreetMap, tel que JOSM⁷⁵ ou iD⁷⁶. Une autre utilisation de fond orthophotographique pour la saisie de données géographiques est directement liée à leur fraîcheur : les applications de remontée d'information ou d'erreurs proposent donc généralement un fond orthophotographique aux utilisateurs qui souhaitent participer à la mise à jour en continue des données topographiques, comme c'est le cas par exemple au sein de l'application cartographique RIPart de l'IGN (Cf. figure 1.23, à gauche).

⁷⁵JOSM est une application cliente à installer, développée en Java, destinée à l'édition avancée pour le projet OpenStreetMap.

⁷⁶iD est un éditeur de données géographiques mis à la disposition de la communauté du projet de cartographie collaborative OpenStreetMap par Mapbox.

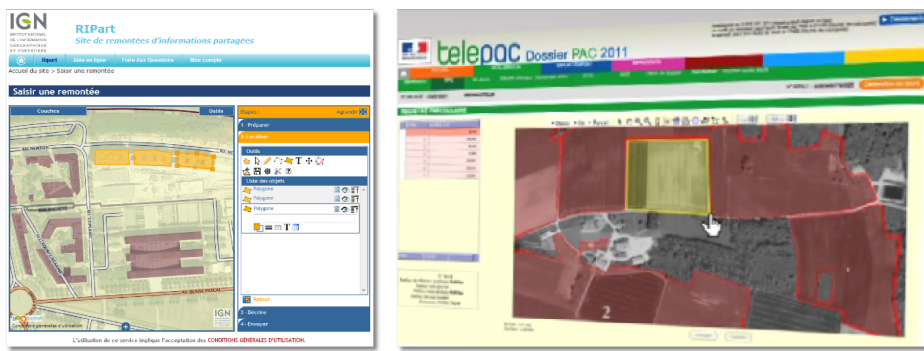


FIGURE 1.23 : Utilisation de fond orthophotographique pour l'aide à la saisie de données géographiques : à gauche sur le site de RPart⁷⁹ de l'IGN, et à droite sur le site Télépac⁸⁰.

Les fonds orthophotographiques sont par ailleurs utilisés en situation de crise. Ils peuvent être intégrés dans un processus de cartographie d'urgence comme évoqué au paragraphe précédent. Ils sont également utilisés pour la **détection d'objets**. La figure 1.24 présente à droite un exemple de visualisation des positions maritimes russes et ukrainiennes identifiées lors de la crise internationale en Crimée en février 2014⁸¹ ; à gauche, une application⁸² mise en place suite à la disparition le 8 mars 2014 de l'avion du vol MH370 au large de la Malaisie pour permettre au grand public de prendre part à la chaîne des secours aux personnes.

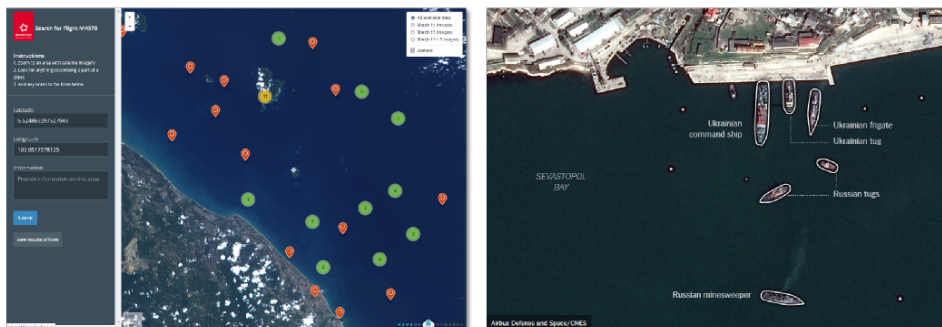


FIGURE 1.24 : Représentations et applications cartographiques pour la détection d'objets géographiques sur un fond orthophotographique : à gauche suite à la disparition du vol MH370 au large de la Malaisie⁸², et à droite au début de la crise internationale en Crimée⁸¹.

Suite à un évènement majeur comme une catastrophe naturelle, il est fréquent d'utiliser des prises de vues aériennes ou satellitaires pour analyser les évolutions temporelles du territoire. Les spatio-cartes (Cf. §1.2.2) réalisées par le SERTIT dans le cadre de la Charte internationale "Espace et catastrophes majeures" ont d'ailleurs souvent pour objet de dresser des états des lieux avant et après la catastrophe puis de comparer ces deux états.

⁷⁹Le site RPart est dédié aux remontées d'informations partagées concernant les évolutions du territoire. Il est consultable à l'adresse suivante : rpart.ign.fr.

⁸⁰Le site Télépac regroupe les téléservices des aides de la PAC. Il est consultable à l'adresse suivante : www3.telepac.agriculture.gouv.fr.

⁸¹Un ensemble de cartes synthétiques concernant le conflit entre l'Ukraine et la Russie est consultable à l'adresse suivante : www.nytimes.com/interactive/2014/02/27/world/europe/ukraine-divisions-crimea.html.

⁸²L'application de détection collaborative est consultable à l'adresse suivante : www.mapbox.com/labs/blackbridge/flight-mh370.

L'utilisation croissante de fond orthophotographique est donc un point commun aux représentations cartographiques inventoriées dans ce paragraphe. Ce type de fond augmente la diversité visuelle et informationnelle de ces représentations mixtes. Cela engendre de nouveaux besoins de visualisation et d'interaction avec plusieurs représentations.

1.3 Géovisualisation : visualiser et interagir avec plusieurs représentations

La géovisualisation est décrite par MacEachren et Kraak [1997] comme étant " *l'ensemble des outils de visualisation permettant l'exploration interactive de données géolocalisées en vue de construire une connaissance sans hypothèse a priori* ". La représentation cartographique devient ainsi un instrument du processus de réflexion de l'utilisateur. Selon les auteurs, cela positionne la géovisualisation au carrefour de la visualisation scientifique, de la cartographie, du traitement d'image, de l'extraction de connaissance et des sciences de l'information géographique. Enfin, les auteurs identifient l'interactivité et le dynamisme comme étant deux caractéristiques fondamentales des applications de géovisualisation.

En parallèle, les interactions utilisateur sont également largement étudiées par un domaine de recherche en informatique très actif, celui de l'Interaction Homme-Machine (IHM) visant à étudier les interfaces et lieux de rencontre entre un utilisateur et un système. L'ensemble des interactions étudiées est donc très varié en fonction du dispositif utilisé qui peut être visuel, auditif, ou sensitif et de la technologie employée. Ces travaux rejoignent ponctuellement les recherches actuelles en géovisualisation : Karray *et al.* [2008] identifient les interfaces basées sur une représentation cartographique comme une des applications pertinentes aux travaux en IHM. Dans ce sens, plusieurs travaux récents appliquent les techniques d'interaction avancées issues des travaux en IHM à la cartographie, étendant ainsi la palette d'outils de géovisualisation déjà proposés par les chercheurs en géomatique. Alvina *et al.* [2014] proposent par exemple une technique d'interaction ayant pour objectif de faciliter le suivi d'un itinéraire routier sur une carte (Cf. figure 1.25).

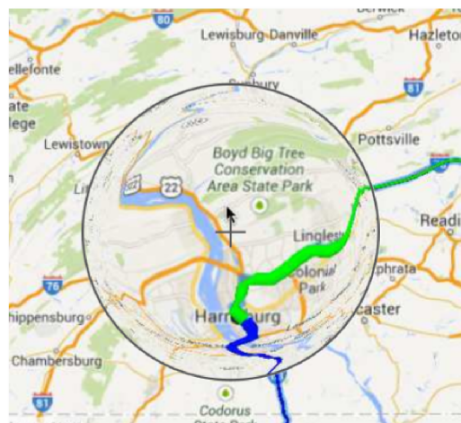


FIGURE 1.25 : Outil interactif de parcours d'un itinéraire par Alvina *et al.* [2014].

En cartographie, l'utilisation des représentations cartographiques dans leur ensemble est un thème de recherche foisonnant visant à décrire, évaluer et anticiper cette utilisation. Nous nous intéressons ici particulièrement aux interactions émanant de la manipulation d'une ou plusieurs représentations cartographiques ainsi qu'aux méthodes de navigation entre plusieurs représentations cartographiques. Dans le but de décomposer ces interactions, Roth [2013] classe des primitives d'interaction correspondant à la réalisation de ces tâches en se fondant sur une expérimentation de catégorisation menée auprès d'experts en conception de cartes interactives. L'auteur identifie ainsi deux grandes catégories d'opérateurs agissant sur la représentation :

- des opérateurs facilitateurs : l'import, l'export, la sauvegarde, l'édition et l'annotation
- des opérateurs de travail : la modification du type de carte, la manipulation de vues, l'affichage séquentiel, la modification de symbolisation, la superposition, le déplacement, le zoom, la reprojection, la recherche, le filtre, l'extraction, l'analyse spatiale.

L'utilisateur peut généralement manipuler les représentations cartographiques mixtes par le biais d'une interface de géovisualisation pour construire et extraire l'information qu'il recherche. Ce type d'interface lui offre la possibilité d'interagir avec une ou plusieurs représentations afin de construire lui-même la visualisation qui lui convient. Il peut également la modifier en temps réel au cours de la navigation. Il est ainsi amené à personnaliser le style et le contenu de la représentation cartographique mixte qu'il visualise (Cf. §1.3.1), ou bien à co-visualiser différentes représentations (Cf. §1.3.2), ou encore à naviguer entre différentes représentations (Cf. §1.3.3).

1.3.1 Personnalisation de la représentation mixte

La disponibilité de données géographiques variées engendre une forte demande de personnalisation de l'utilisateur et conduit l'émergence de services de cartographie en ligne. Dès lors que l'utilisateur a accès à des opérateurs de personnalisation, les rôles du cartographe et du lecteur de la carte sont redistribués. En effet, le lecteur se voit confier une partie du travail traditionnellement confié au cartographe (le choix de la symbolisation) alors même qu'il ne possède pas nécessairement d'expertise en théorie de la cartographie. Par conséquence, des applications de géovisualisation ont été mises en place pour permettre à l'utilisateur de personnaliser son fond de carte (Cf. §1.3.1.1), de choisir ou de construire son fond de carte (Cf. §1.3.1.2) ou d'ajouter ses propres données et de les personnaliser (Cf. §1.3.1.3).

1.3.1.1 Personnalisation du fond de carte

D'une part, des plateformes de cartographie en ligne comme MapBox⁸³ ou MapStack⁸⁴ de l'agence de design américaine Stamen fournissent des fonds de carte stylisés prédéfinis et des outils de personnalisation de la légende de ces fonds de carte. Cela permet à tout utilisateur de créer des fonds cartographiques variés, mais sans garantie de qualité cartographique.

D'autre part, les travaux de recherche en cartographie se sont attachés à proposer des **méthodes d'aide à la conception de légende** visant à guider et aider un utilisateur novice en cartographie à construire une carte en lui fournissant des outils garantissant la qualité (lisibilité, pertinence sémiologique, originalités, esthétique, etc.) de la carte produite. Pour cela, il s'agit

⁸³L'éditeur de légende cartographique en ligne MapBox est accessible à l'adresse suivante : www.mapbox.com/editor/#style.

⁸⁴L'application de conception cartographique en ligne MapStack est accessible à l'adresse suivante : mapstack.stamen.com/edit.html.

d'assister l'utilisateur dans la résolution d'un problème complexe qu'est la construction d'une légende cartographique, en mettant à sa disposition les connaissances nécessaires pour qu'il puisse personnaliser le fond de carte qu'il souhaite utiliser.

Une version semi-automatique de cette approche consiste à proposer des solutions prédéfinies adaptées à un besoin de personnalisation donné afin d'en réduire la complexité. L'utilisateur novice est ainsi assuré d'obtenir une légende lui permettant de créer un fond personnalisé de qualité, dès lors que son besoin peut être exprimé grâce aux paramètres des solutions prédéfinies. Dans cet esprit, Harrower et Brewer [2003] proposent des gammes de couleurs adaptées à une carte thématique donnée et paramétrée par l'utilisateur. Dominguès et Hoarau [2011] fournissent des méthodes de symbolisation cartographique adaptées à la conception de randonnées en tenant compte des attentes et des critiques des randonneurs identifiées par Dominguès et Baldit-Schneller [2010]. Dhee [2013] et Kröger *et al.* [2013] proposent des adaptations de légendes topographiques pour les déficients visuels de la couleur.

Des méthodes de personnalisation automatique ont également été proposées. Dominguès *et al.* [2012] et Smith [2013] proposent des méthodes automatiques de construction de légendes cartographiques fondées sur l'utilisation de système expert et de raisonnement ontologique. Christophe [2009] concilie les préférences de l'utilisateur avec l'expertise cartographique ou l'expertise artistique par des méthodes de résolution de problèmes contraints. Enfin, Buard et Ruas [2009] mettent en place un système multi-agent au sein duquel chaque ligne de légende a pour objectif de déterminer sa symbolisation par rapport à celles des lignes de légende avec qui elle a des relations sémantiques.

1.3.1.2 Choisir ou construire le fond de carte

Par ailleurs, les applications de géovisualisation permettent souvent à l'utilisateur de choisir ou de construire le fond de carte de la représentation cartographique qu'il visualise. Cela a une influence sur le style de la représentation cartographique, sur son contenu ou sur les deux, comme l'illustrent les différents exemples des figures 1.26, 1.27 et 1.28. Des interactions plus ou moins sophistiquées sont fournies à l'utilisateur, lui permettant de construire un fond de carte plus ou moins mixte.

Basculer d'une représentation à une autre Le type d'opérateur le plus simple pour changer de fond de carte permet à l'utilisateur de basculer entre plusieurs représentations cartographiques faisant office de fond de carte, généralement une carte routière et une vue aérienne. C'est le cas de l'outil qui est proposé par les services de cartographie en ligne Bing Maps⁸⁵ (Cf. figure 1.26) ou Google Maps.

Ce basculement provoque un changement radical dans le contenu de la visualisation en passant d'un fond topographique à un fond orthophotographique. Celui-ci s'accompagne également d'un changement radical dans le style de la représentation étant donné les impacts visuels très différents de ces deux types de représentations.

⁸⁵Bing Maps est un service de cartographie en ligne dont l'interface de visualisation est accessible à l'adresse suivante : <https://www.bing.com/maps/>.

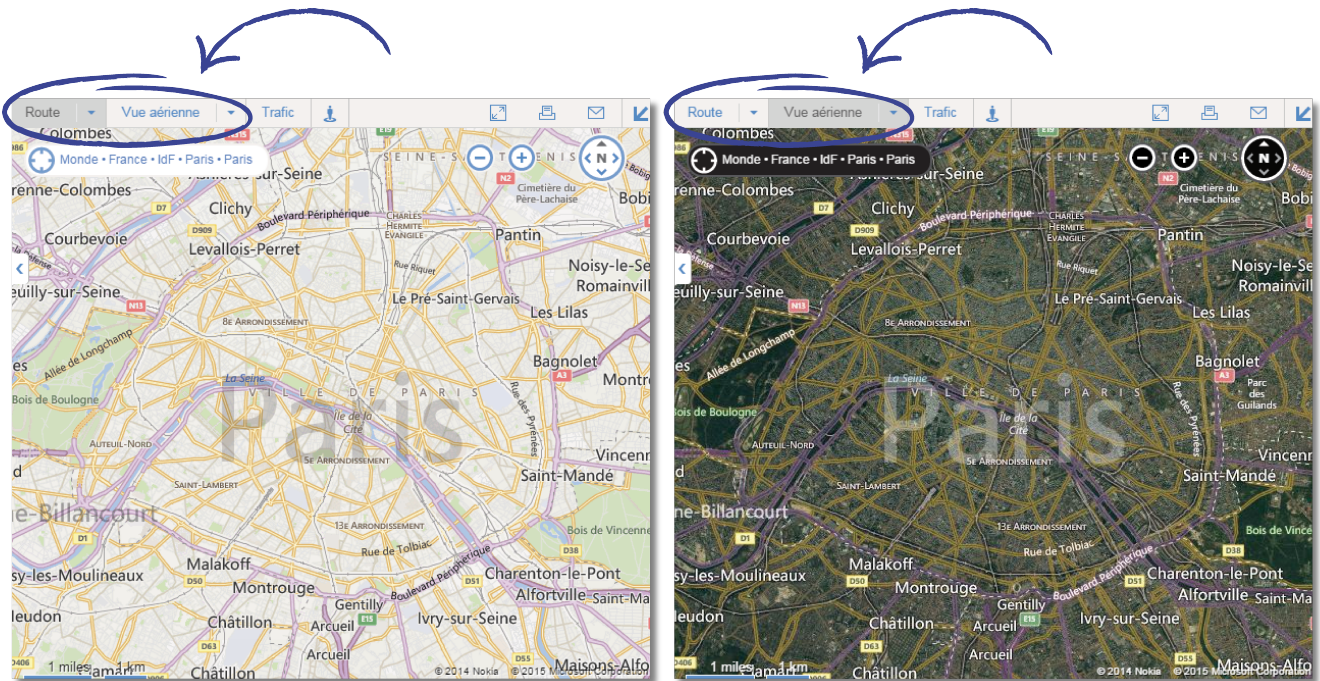


FIGURE 1.26 : Différentes fonctionnalités proposées à l'utilisateur pour choisir son fond de carte sur le service de cartographie en ligne Bing Maps⁸⁵

Fondu enchaîné entre deux représentations cartographiques Un deuxième type de personnalisation du fond de carte permet à l'utilisateur de configurer la transparence de deux fonds superposés par un curseur paramétré pour passer progressivement d'une représentation à l'autre. Cet outil permet donc de créer des états mixtes intermédiaires entre deux représentations cartographiques en les mélangeant visuellement par transparence. La figure 1.27 présente deux exemples différents de curseurs ayant chacun ses spécificités.



FIGURE 1.27 : Curseurs de fondu enchaîné entre deux représentations cartographiques : à gauche sur le plan interactif de la ville de Lannion⁸⁶ et à droite sur le géoportail du Luxembourg⁸⁷.

L'exemple de gauche de la figure 1.27 illustre le portail de la ville de Lannion⁸⁶ qui propose de basculer d'un plan à une photo, et de pouvoir choisir entre plusieurs couvertures photographiques dans le temps. L'exemple de droite de la figure 1.27 illustre le géoportail national du Luxembourg⁸⁷ qui propose un curseur entre une image aérienne et différents fonds topographiques (en couleur, en noir et blanc, réseau routier ou fond blanc).

Construire le fond par superposition de plusieurs représentations potentiellement transparentes Enfin, une dernière façon de permettre à l'utilisateur de choisir et personnaliser son fond de carte est de lui proposer des couches de données qu'il peut rendre visibles, et dont il peut choisir l'ordre de superposition et le niveau de transparence. C'est le cas dans la plupart des applications de type mashup ou les géoportails. L'utilisateur a très fréquemment la possibilité de se construire un fond de carte mixte en mélangeant plusieurs couches ou fonds de carte par transparence ou en superposant des couches vectorielles telles que les toponymes de localités, ou les routes.

Le Géoportail de l'IGN propose par exemple différentes couches de données que l'utilisateur peut afficher et superposer à volonté (Cf.figure 1.28). Il peut ainsi choisir le contenu visualisé (carte topographique, carte marine, carte géologique, ensemble de couches vecteur, etc.). Ce choix définit aussi le style de la représentation visualisée (style topographique, carte historique, etc.).

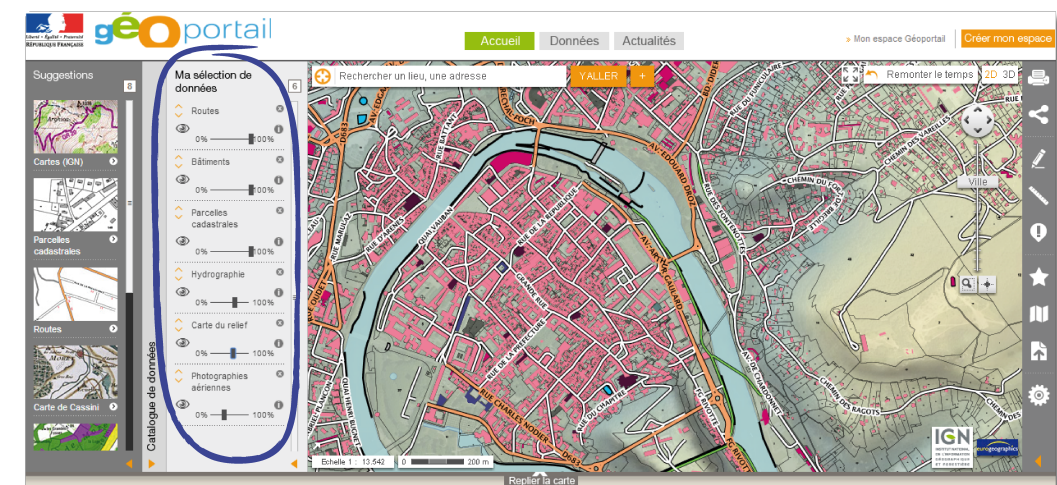


FIGURE 1.28 : Fonctionnalités de construction de son fond de carte sur le Géoportail®⁸⁹ de l'IGN.

Un grand nombre de possibilités s'offrent ainsi à l'utilisateur pour personnaliser le contenu de la représentation qu'il visualise. Cependant, l'utilisation de la transparence sur deux fonds initialement conçus pour être autosuffisants influence fortement le style de ces représentations et conduit dans certains cas à des représentations très inhabituelles et parfois peu lisibles. L'uti-

⁸⁶Le plan interactif de la ville de Lannion est accessible à l'adresse suivante : <http://lannion.geoconcept.com/geoweb-lannion/portail.do>.

⁸⁷Le géoportail du Luxembourg est accessible à l'adresse suivante : <http://map.geoportail.lu/?lang=fr>

⁸⁹Le Géoportail® est accessible à l'adresse suivante : <http://www.geoportail.gouv.fr>.

lisation de représentations cartographiques pour créer un fond de carte mixte est analysée plus en détail dans l'enquête que nous présentons au paragraphe 1.4.

1.3.1.3 Ajouter et symboliser ses données personnelles

L'utilisateur est parfois amené à personnaliser le contenu de la représentation en l'enrichissant, lorsqu'il a accès à des fonctionnalités de chargement de données ou de saisie d'information. Il peut ainsi ajouter la trace GPS d'une de ses randonnées ou l'ensemble des lieux remarquables enregistrés grâce à son géonavigateur, ou alors il peut préparer une randonnée en traçant son itinéraire au préalable, ou réaliser un croquis pour créer le plan d'un évènement.

Permettre à l'utilisateur d'ajouter ses propres données, c'est lui donner la possibilité de rendre la représentation cartographique plus mixte encore. Cela élargira potentiellement les thématiques abordées par la représentation cartographique. Cependant, si l'utilisateur charge ou dessine des données sur un fond de carte, rien n'assurera leur cohérence géométrique ou de niveau de détail avec ce fond de carte.

Selon le type de données disponibles et les fonctionnalités de rendu proposées par l'API cartographique utilisée, l'utilisateur pourra parfois choisir la symbolisation des couches de données qu'il visualise, surtout si celles-ci sont d'origine vectorielle. S'il charge ou ajoute des données à la carte, il peut parfois choisir la symbolisation de ces données, afin de personnaliser sa représentation cartographique. A titre d'exemple, sur le Géoportail de l'IGN, il est possible de saisir des points, des lignes, des courbes à main levée, des polygones et des textes, puis de paramétrer leur couleur, leur transparence et l'épaisseur des traits et contours.

1.3.2 Covisualisation de représentations cartographiques

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu comment l'utilisateur peut personnaliser la représentation cartographique qu'il visualise. Cependant, les fonctionnalités de personnalisation ne génèrent pas nécessairement des représentations de qualité cartographique satisfaisante. En effet, les applications de géovisualisation proposant des fonctionnalités de personnalisation ne sont pas associées à une expertise cartographique comme support d'aide à la conception. En conséquence, d'autres types d'application de géovisualisation ne permettent pas à l'utilisateur de modifier les représentations cartographiques dont il dispose afin d'éviter une mauvaise qualité cartographique. Ces applications adoptent une approche différente pour permettre à l'utilisateur de consulter conjointement plusieurs représentations cartographiques complémentaires : elles lui offrent la possibilité de les covisualiser.

Le préfixe "co-" exprime l'association, la simultanéité [Larousse, 2010]. La **covisualisation** est donc la visualisation simultanée de deux ou plusieurs représentations différentes au sein d'une même interface de visualisation. Les représentations cartographiques covisualisées au sein d'une application de géovisualisation peuvent être hétérogènes en termes de style cartographique, d'échelle de visualisation, de contenu géographique ou encore de temporalité. Ce sont généralement ces hétérogénéités qui rendent les représentations complémentaires et propices à la covisualisation.

Cette section a pour objectif de dresser un inventaire des outils de covisualisation actuellement disponibles au sein des applications de géovisualisation existantes.

1.3.2.1 Intégration de vues géoréférencées à la manière de la réalité augmentée

Joliveau [2014b] identifie plusieurs enjeux en recherche en géographie pouvant être explorés par le biais de la covisualisation de deux représentations, comme l'étude des espaces romanesques ou filmiques ou l'analyse historique de cartes ou de photographies anciennes (Cf. figure 1.29). Ces études peuvent être menées par le biais d'interfaces de visualisation cartographique au sein desquelles ont été intégrées par simple superposition des données image préalablement géoréférencées. Les deux applications cartographiques présentées à la figure 1.29 sont réalisées selon ce principe : à gauche, une carte ancienne est intégrée à une carte Google Maps en 2D, et à droite, une photographie historique est intégrée à Google StreetView en 3D. Dans les deux cas, les représentations à deux temporalités peuvent être comparées et aussi mélangées visuellement par transparence.

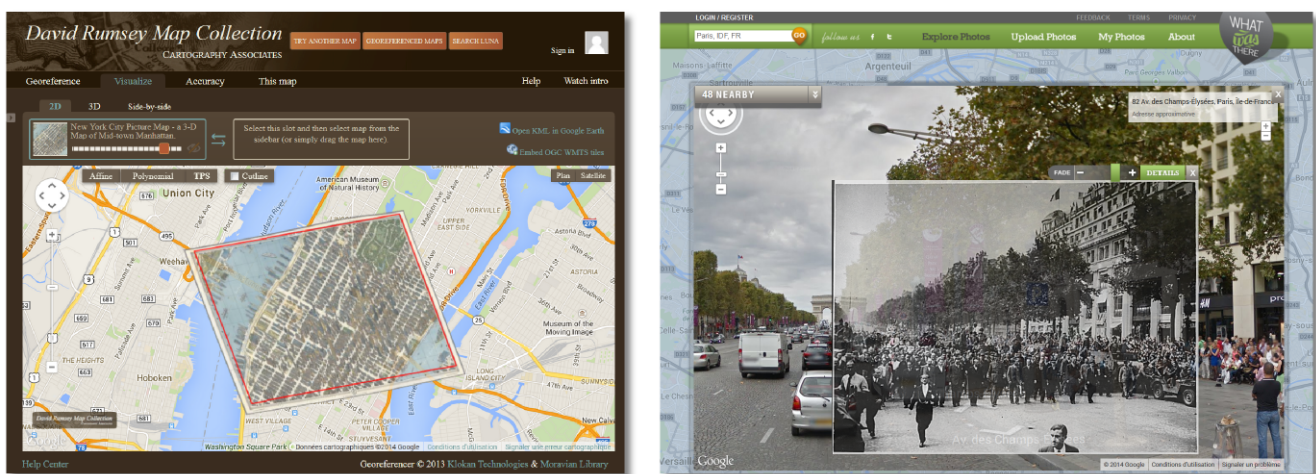


FIGURE 1.29 : Visualisation d'une carte historique⁹², et d'une photo historique⁹³, dans leur contexte cartographique et photographique actuel.

1.3.2.2 Outils de fenêtre cartographique : le trou, la carte de situation et la loupe (lense et magnifier)

Un premier type d'outil de covisualisation de deux représentations est celui que nous appellerons *fenêtre cartographique*. Il se présente sous la forme d'un trou (généralement rond ou carré) dans l'une des représentations covisualisées, laissant apparaître une autre représentation. Cela peut permettre de visualiser :

- deux représentations de temporalités différentes comme dans la figure 1.30 à gauche où une carte historique transperce une carte récente,
- deux représentations différentes en termes de style et de contenu comme dans la figure 1.30 au centre où une orthophoto transperce une carte topographique,
- deux représentations cumulant ces deux différences comme dans la figure 1.30 à droite où une orthophoto récente transperce une carte historique.

⁹²La collection de cartes anciennes géoréférencées de David Rumsey est visualisable à l'adresse suivante : <http://rumsey.georeferencer.com/map/Gol2eKcZkfXIAdQolpIGHC/201411012306-PafuFH/visualize>.

⁹³D'autres photographies historiques sont consultables sur le site *What Was There* à l'adresse suivante : <http://www.whatwasthere.com/>.

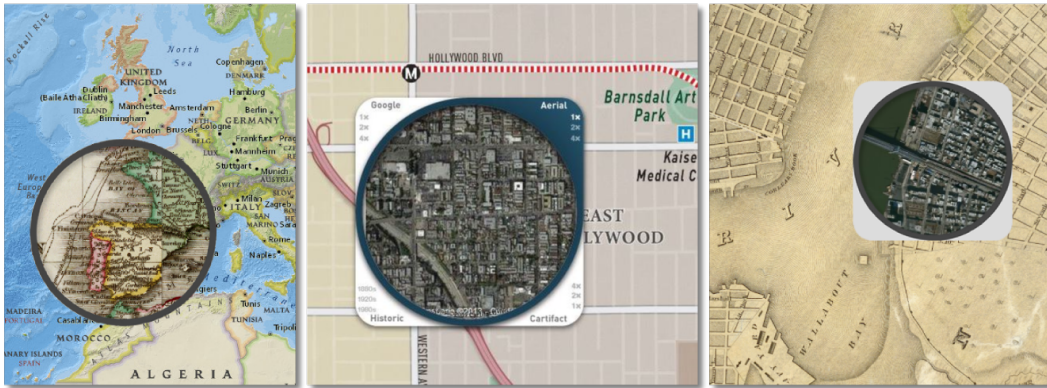


FIGURE 1.30 : Fenêtres cartographiques laissant apparaître une représentation d'un autre style et/ou d'une autre temporalité : à gauche pour comparer le monde entre 1812 et 2013⁹⁷, au centre dans l'application Cartifact⁹⁸ et à droite pour étudier l'évolution de Chicago⁹⁹ suite à l'incendie de 1868.

Les outils de fenêtre cartographique de ce type sont généralement interactifs. L'utilisateur peut saisir l'outil et déplacer la fenêtre cartographique afin de visualiser la représentation intégrée sur la zone qui l'intéresse. Inversement, l'utilisateur peut aussi se déplacer dans l'espace géographique de la représentation principale. Cela modifie l'emprise géographique de la fenêtre cartographique, même si elle est restée fixe à l'écran. Cependant, cette manipulation est moins intuitive.

Outils de fenêtre cartographique à une échelle différente Lorsque l'échelle de visualisation n'est pas la même au sein de l'outil de fenêtre cartographique, cela engendre des outils un peu différents, et particulièrement intéressants dans le contexte de la cartographie.

D'une part, si la représentation cartographique intégrée est à une plus petite échelle que la représentation principale, la fenêtre cartographique est une carte de situation (Cf. figure 1.32, à gauche). La carte de situation n'est généralement pas une réduction de la carte générale, mais bien une autre représentation réalisée à une autre échelle selon les principes de généralisation cartographique.

Les cartes de situation constituent un cas particulier en terme d'interaction : elles sont généralement asservies à la représentation principale afin de répondre à leur exigence de localisation de l'utilisateur au sein d'un territoire plus étendu. Lorsque l'utilisateur se déplace dans la carte principale, l'emprise de la carte est actualisée afin de correspondre à la nouvelle localisation et inversement.

Un cas particulier intéressant de fenêtre cartographique à plus petite échelle est le bouton pour basculer d'une représentation cartographique à une autre proposé par le service de cartographie en ligne Google Maps (Cf. figure 1.32, à droite). En effet, ce n'est pas vraiment une carte de situation puisque l'échelle cartographique n'est pas configurée pour être utile à la localisation globale de l'utilisateur. L'échelle de la représentation cartographique intégrée est adaptée dynamiquement pour que la fenêtre cartographique représente la même emprise géographique

⁹⁷ L'application *The World in 1812 and 2013* est accessible à l'adresse suivante : <http://story.maps.arcgis.com/apps/StorytellingSwipe/index.html?appid=b8ece5952db443858442f122984602ba>.

⁹⁸ L'application *Cartifact* est accessible à l'adresse suivante : <http://maps.cartifact.com/lany/>.

⁹⁹ L'article du *Smithsonian* est accessible à l'adresse suivante : <http://www.smithsonianmag.com/history/what-did-chicago-look-great-fire-180947929/>.

que la représentation générale. La fenêtre cartographique présente ainsi un aperçu miniature de la représentation que l'utilisateur pourrait visualiser s'il décidait de basculer vers le mode orthophotographique.

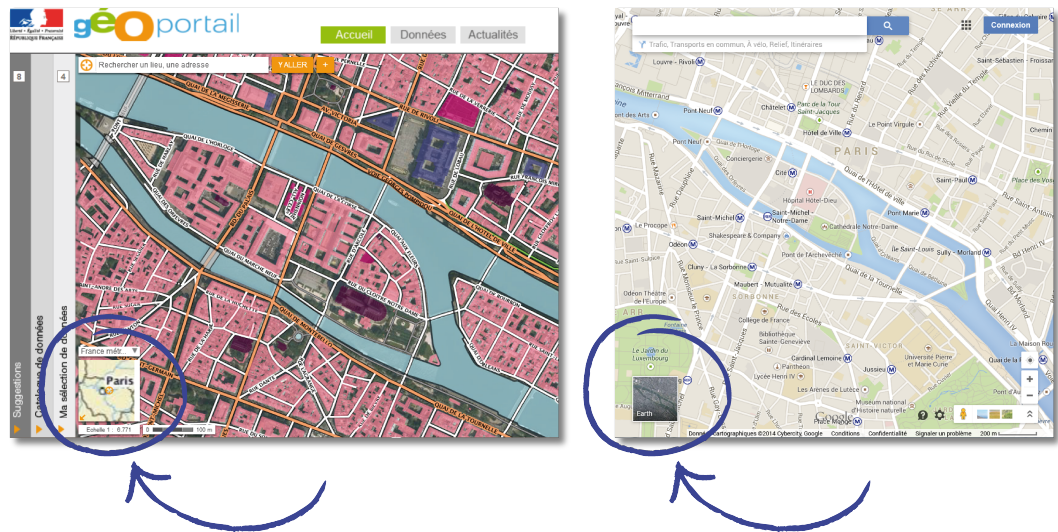


FIGURE 1.31 : Exemple de carte de situation sur le Géoportail⁴, d'aperçu miniature dans GoogleMaps³⁶

D'autre part, si la représentation cartographique est à plus grande échelle que la représentation principale, la fenêtre cartographique fait office de loupe. Cette possibilité est fréquemment utilisée sur Internet par les sites de vente en ligne, pour permettre à l'acheteur de zoomer sur des détails des produits qui l'intéressent (Cf. figure 1.32, à gauche). Dans le cas de visualisation cartographique, la loupe est généralement améliorée (Cf. figure 1.32, à droite) par rapport à un outil de grossissement, dès lors qu'elle présente une représentation initialement conçue à plus grande échelle et non pas un agrandissement de la zone.

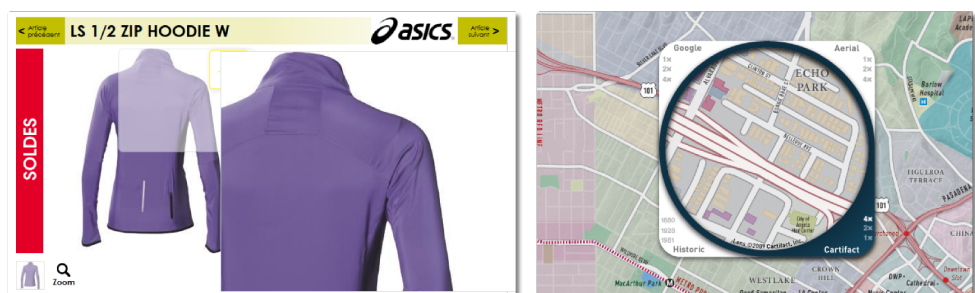


FIGURE 1.32 : Exemple de loupe par grossissement sur un site commercial de vente de vêtements sportifs¹⁰², et de loupe cartographique présentant une représentation généralisée dans l'application Cartifact¹⁰³

¹⁰²Un exemple de loupe de grossissement est accessible à l'adresse suivante : www.go-sport.com/sport/running/w-s-running-l-s-1-2-zip/f-73005040203-mb0000022cb.html.

¹⁰³La loupe est un outil proposée par le biais de l'API Cartifact, disponible à l'adresse suivante : www.cartifact.com/webmaps/mapportal.

1.3.2.3 Outil de glissement par barre verticale (le swipe)

Un deuxième type d'outil de covisualisation permet de glisser d'une représentation cartographique à une autre. Ce type d'outil se présente généralement sous la forme d'une barre verticale que l'utilisateur peut saisir et faire glisser latéralement pour faire apparaître l'une ou l'autre des représentations covisualisées, comme sur tous les exemples de la figure 1.33. Cet outil peut parfois apparaître sous la forme d'un curseur qui déterminera le positionnement de la barre verticale, ou encore être directement relié à la position de la souris que l'utilisateur devra positionner à l'emplacement où il souhaite voir la barre verticale.

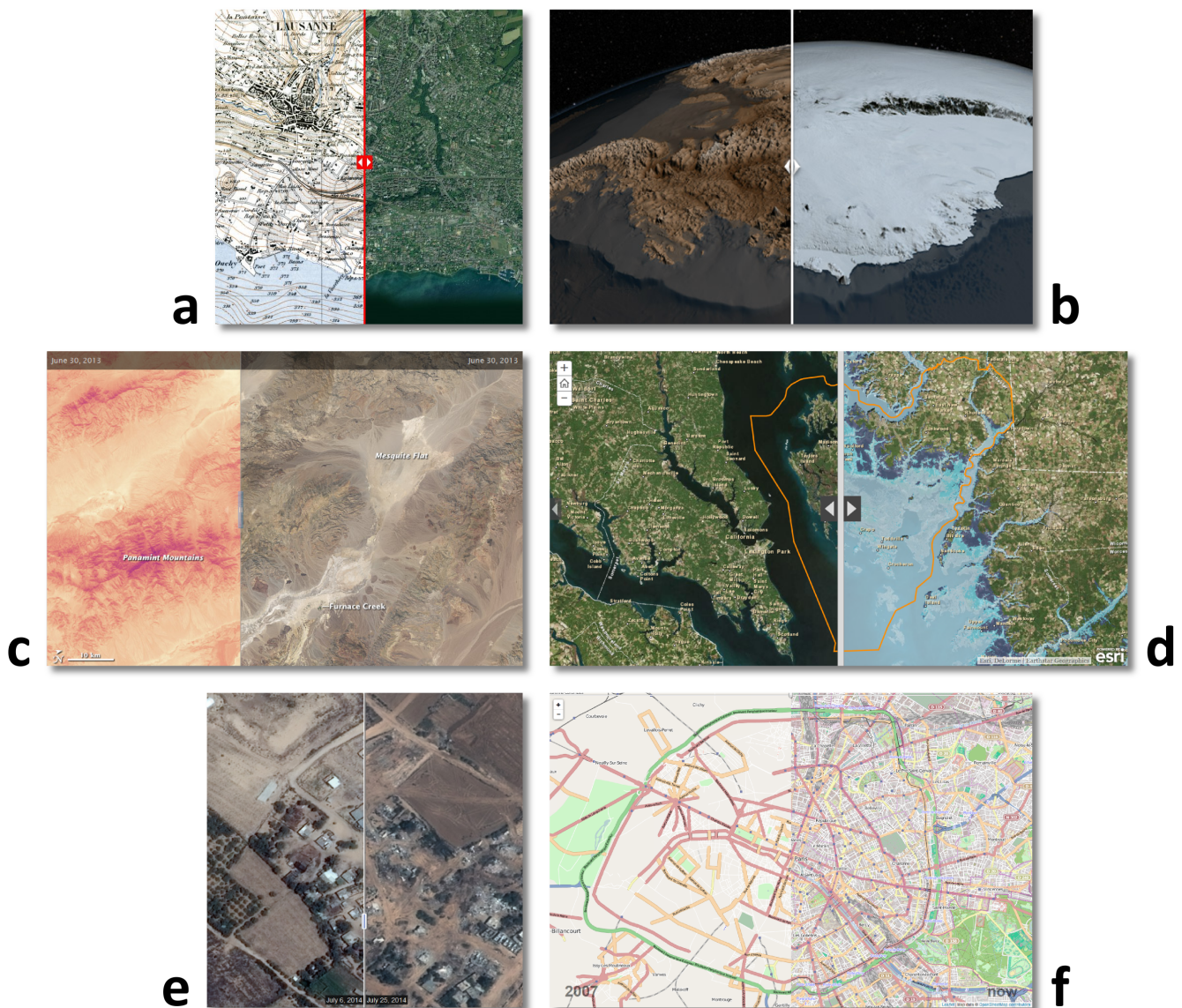


FIGURE 1.33 : Outils de swipe : Glisser pour covisualiser deux représentations. a) Illustration de la fonte des glaces sur le glacier de Morteratsch¹¹⁰ b) Illustration du pôle Nord avec et sans glace par la Nasa¹¹¹ c) Illustration de la température dans la Vallée de la mort¹¹² d) Simulation de la montée des eaux dans le Maryland¹¹³ e) Étude des dégâts de la guerre à Gaza en 2014¹¹⁴ f) Illustration de l'évolution de la carte du projet OSM¹¹⁵

L'outil de glissement (aussi appelé swipe en anglais) permet ainsi de comparer deux représentations cartographiques différentes. Les exemples en haut de la figure 1.33 présentent deux représentations différentes en termes de contenu : une carte topographique et une orthophoto à gauche, et une représentation avec et sans glace du pôle sud à droite. Les exemples au centre de la figure 1.33 présente des représentations cartographiques auxquelles on ajoute une surcouche thématique : la température de l'air sur la zone du grand canyon à gauche, la submersion de la terre par des inondations à droite. Enfin, les exemples en bas de la figure 1.33 présentent des représentations de temporalités différentes : pour évaluer les dégâts de la guerre dans la bande de Gaza sur des prises de vue aériennes à gauche, et pour jauger de l'avancement du projet OpenStreetMap entre 2007 et 2014 à droite.

L'utilisateur peut interagir avec les représentations en déplaçant la barre verticale ou bien en se déplaçant dans la représentation cartographique mixte ainsi créée. Cela lui permet de comparer deux types de représentation sur un même territoire par glissement, sans mélanger visuellement les représentations. Cependant, l'utilisateur est également limité par l'outil : il ne peut généralement pas inverser la position des représentations covisualisées par rapport à la barre verticale. Cela rend certaines comparaisons impossibles : si l'on considère l'exemple en haut à gauche de la figure 1.33, l'utilisateur ne pourra par exemple pas comparer en même temps une représentation topographique d'un objet se trouvant à l'est d'un objet dont il souhaiterait observer une représentation orthophotographique. Pour faire cela, il sera dans l'obligation de multiplier les manipulations latérales de la barre verticale.

1.3.2.4 Outil de juxtaposition : les vues asservies

Un troisième type d'outil de covisualisation est celui consistant à juxtaposer deux vues asservies d'un même territoire représenté de deux façons différentes. Les vues sont asservies en termes d'emprise géographique visualisée : lorsque l'utilisateur se déplace ou zoome dans l'une, l'emprise de l'autre est actualisée en temps réel. La figure 1.34 à droite présente l'exemple du portail Géobretagne¹¹⁶ qui propose une covisualisation du territoire à deux temporalités différentes grâce à une prise de vue aérienne historique et le mode hybride de GoogleMaps. La figure 1.34 à droite présente un exemple de trois vues asservies en position et en niveau de zoom fournissant une représentation du Mode d'Occupation du Sol¹¹⁷, une vue aérienne et une carte thématique visant à analyser l'occupation du sol en Île de France.

¹¹⁰L'application de géovisualisation dédiée à l'observation de la fonte des glaces est mise en ligne par Swisstopo à l'adresse suivante : http://map.geo.admin.ch/?bgLayer=ch.swisstopo.swissimage&topic=ech&swipe_ratio=0.46&layers=ch.swisstopo.hiks-siegfried.

¹¹¹L'application de géovisualisation du pôle nord est mise en ligne à l'adresse suivante : www.nasa.gov/topics/earth/features/antarctic-map.html.

¹¹²L'application de géovisualisation de la température est mise en ligne par la Nasa à l'adresse suivante : earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=81562.

¹¹³L'application de géovisualisation dédiée à la montée des eaux est accessible à l'adresse suivante : www.arcgis.com/apps/StorytellingSwipe/?appid=d0becdcde753d4038a62c7a9b6d15279a#.

¹¹⁴Une série d'images de comparaison temporelle est mise en ligne par le *Wall Street Journal* à l'adresse suivante : graphics.wsj.com/gaza-before-after/.

¹¹⁵L'application de géovisualisation dédiée à l'évolution du projet OSM est accessible à l'adresse suivante : mvexel.github.io/thenandnow/.

¹¹⁶Le portail Géobretagne est accessible à l'adresse suivante : <http://geobretagne.fr/sviewer/dual.html>.

¹¹⁷Le triptyque de consultation du MOS mis en ligne par l'IAU-île de France est accessible à l'adresse suivante : <http://carto.iau-idf.fr/webapps/basemos/mos3.html>.

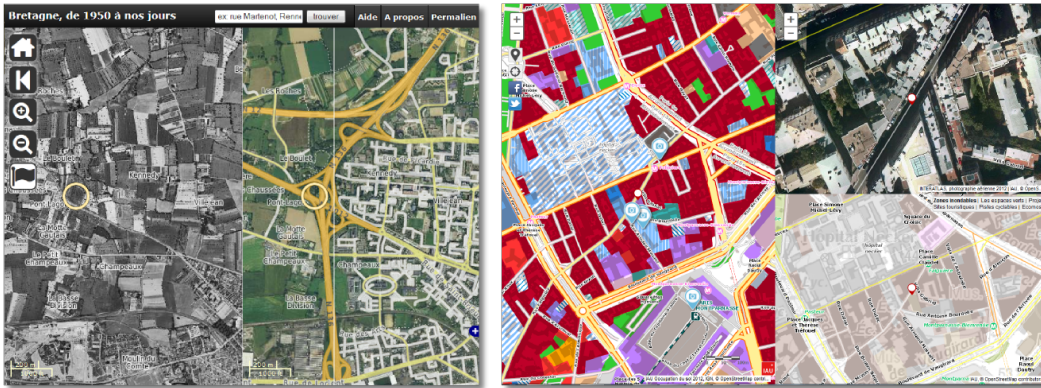


FIGURE 1.34 : Vues asservies : à gauche sur le portail Géobretagne¹¹¹ et à droite sur le site de l'IAU¹¹²

Le portail Géobretagne met en évidence une lacune notable de cet outil de covisualisation : il ne permet pas de comparer facilement un même objet sur les deux vues car il est impossible de rapprocher cet objet de son homologue étant donné que les vues sont asservies. Pour aider l'utilisateur dans sa comparaison, le concepteur de l'interface de visualisation a donc ajouté un pointeur rond sur chacune des représentations indiquant des localisations identiques. L'un ou l'autre des pointeurs est lié à la position de la souris de l'utilisateur selon s'il parcourt l'une ou l'autre des représentations.

1.3.2.5 Outils pour focaliser l'attention de l'utilisateur sur une zone ou un objet géographique

Enfin, un dernier type d'outil de covisualisation vise à mettre en valeur les éléments pertinents dans une représentation cartographique en orientant l'attention de l'utilisateur sur ces éléments. Pour cela, différentes représentations lui seront proposées selon la pertinence des objets qu'on souhaite lui faire observer (Cf. figures 1.35 et 1.36). Cockburn *et al.* [2009] présentent une revue des travaux en IHM adoptant cette approche. Ces travaux définissent trois types de zones d'intérêt :

- La zone de **Focus** sur laquelle l'utilisateur est invité à porter son attention,
- La zone de **Contexte** est celle qui n'est pas affectée par la méthode de focalisation de l'attention,
- La zone de **Transition** faisant un lien entre les deux autres zones, introduite par Pietriga et Appert [2008].

Cette approche nécessite en premier lieu de délimiter la zone de focus. Les premiers travaux à ce sujet utilisent simplement une zone de tampon à partir du centre de la zone de focus. Bektas et Çöltekin [2012]; Bektas *et al.* [2015] utilisent les informations de suivi du regard fournies par un eyetracker et définissent l'emplacement de la zone de focus en fonction des lieux de fixation du regard. Trapp *et al.* [2011a] génèrent des masques définissant la zone de focus à partir des objets géographiques et de la profondeur de la scène. Enfin, Pindat *et al.* [2012] extraient l'emprise de la zone de focus en tenant compte du contenu de la représentation cartographique.

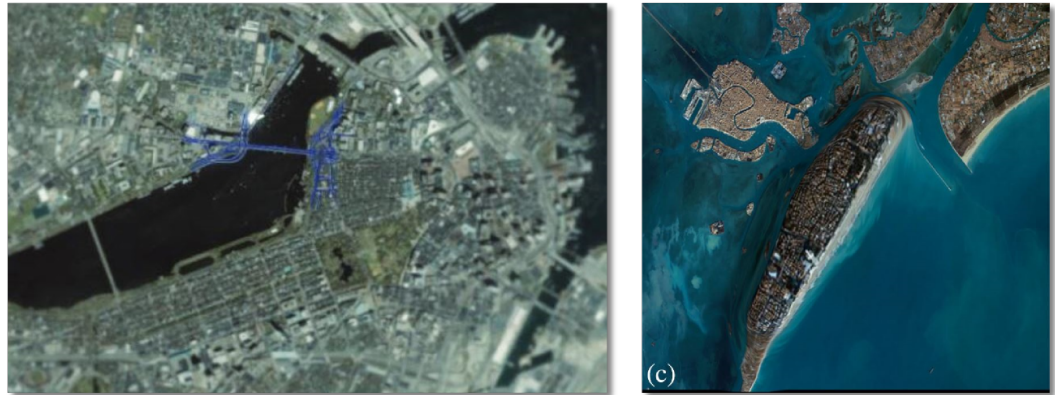


FIGURE 1.35 : Exemples de méthodes de focalisation de l'attention par Pindat *et al.* [2012], et Bektas et Çöltekin [2012]; Bektas *et al.* [2015].

Dans un second temps, plusieurs propositions ont été faites pour inciter à la focalisation de l'attention. Bektas et Çöltekin [2012]; Bektas *et al.* [2015] appliquent un effet de flou dans la zone de contexte, notamment en dégradant le recalage entre des images stéréoscopiques dans le contexte de visualisation en 3D. Trapp *et al.* [2011a] mettent en valeur les éléments en ajoutant un effet de vignettage et en utilisant des couleurs vives dans la zone de focus et des couleurs ternes dans la zone de contexte. Enfin, Trapp *et al.* [2008] représentent les données avec des niveaux de détail et des degrés d'abstraction différents.

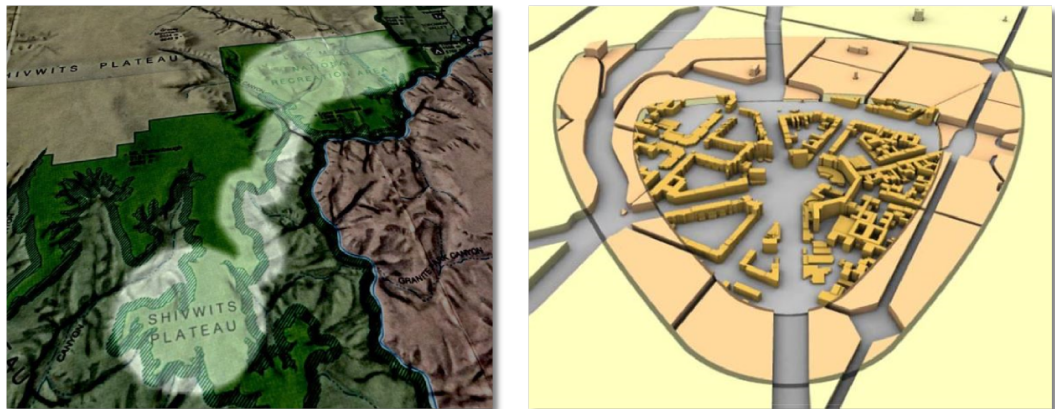


FIGURE 1.36 : Exemples de méthodes de focalisation de l'attention par Trapp *et al.* [2011a] et Trapp *et al.* [2008].

Cette section a mis en lumière le besoin d'utilisation conjointe de plusieurs représentations, ainsi que celui de pouvoir passer d'une représentation à l'autre. De même que pour la conception de représentations cartographiques mixtes, l'aspect géométrique est plus exploré pour permettre cette covisualisation que l'aspect graphique. En effet, la question commune soulevée par ces outils de covisualisation est de savoir comment découper une représentation pour l'intégrer, la juxtaposer ou la superposer à une autre représentation. Très peu d'initiatives visent à modifier les représentations covisualisées afin d'améliorer ou de rendre plus efficace l'expérience de l'utilisateur.

1.3.3 Un deuxième constat : un besoin grandissant d'interactivité et de navigation entre représentations cartographiques

L'inventaire des outils de personnalisation et de covisualisation de représentations cartographiques nous conduit à établir un deuxième constat fondateur : la diversité des représentations existantes implique un besoin grandissant d'interactivité avec la représentation et de navigation entre représentations complémentaires. Ce besoin soulève la question de la transition entre représentations. En effet, pour pouvoir naviguer d'une représentation à l'autre, l'utilisateur doit disposer d'un ensemble continu de représentations. De même, l'utilisation de plusieurs représentations dans un environnement interactif au sein duquel l'utilisateur peut naviguer dans l'espace géographique en 2D ou en 3D pose la question des transitions entre les différentes représentations utilisées pour construire cet environnement. Nous présentons ici deux exemples de travaux s'intéressant à proposer des transitions fluides pour accompagner l'utilisateur au cours de la navigation dans l'espace géographique. Ces travaux visent à créer des états intermédiaires entre les différentes représentations covisualisées, l'un pour passer de l'une à l'autre de façon continue lorsque l'utilisateur change d'échelle, l'autre pour les raccorder entre elles lorsque l'utilisateur change de position.

Projection adaptative pour naviguer entre les échelles Pour pallier aux interactions de déplacement et de zoom de l'utilisateur, Jenny [2012] construit une grille indiquant la projection la plus adaptée en fonction de l'échelle de visualisation et de la latitude du centre de la carte (Cf. figure 1.37). Cette grille est conçue pour être utilisée au sein d'une application cartographique dans laquelle la projection s'adapte à la position et au zoom fixés par l'utilisateur en réalisant un morphing en temps-réel de la représentation cartographique visualisée. Ainsi, l'utilisateur visualise différentes représentations cartographiques (réalisées par le biais de différentes projections cartographiques) qu'il configure lui-même en naviguant dans la carte.

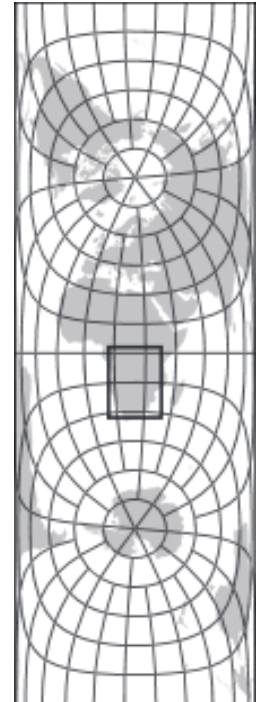


FIGURE 1.37 : Exemple de projection adaptée à un continent et minimisant les déformations sur la zone d'intérêt centrale.

Navigation immersive en 3D La navigation dans une scène modélisée en 3D est un des facteurs contribuant à la sensation d'immersion au cours de la visualisation. De plus en plus d'applications proposent une navigation au sein de modèles 3D urbains à la façon de Google Street View¹¹⁸ ou de la plateforme Itowns [Devaux et al., 2012]. L'utilisateur visualise alors des vues panoramiques issues de l'assemblage d'images acquises à la hauteur de vue d'un piéton.

La fluidité de la navigation est primordiale pour ressentir cette impression d'immersion. Ainsi, des travaux en rendu basé image s'attachent à concevoir des transitions entre différentes scènes capturées photogrammétriquement. Brédif [2013] améliore les transitions entre images lors de la navigation par application de distorsions d'images à la volée, suppression des éléments mobiles (voitures, piétons, etc.) et placage de textures photographiques selon plusieurs points de vue. Brédif [2014] présente une méthode pour combiner plusieurs images d'une même scène en prenant en compte la forme des objets et l'incertitude liée à la position de la caméra lors de l'acquisition des différentes photographies.

Les méthodes de **rendu basé image** utilisent le contenu des images pour les positionner dans l'espace, en faisant abstraction d'une géométrie précise de la scène.

¹¹⁸Site web de Google Street View : <https://www.google.com/maps/views/u/0/streetview>

Enfin, la navigation au sein de ce type d'environnement se fait par interaction de l'utilisateur qui peut se déplacer, orienter la scène et modifier le point de vue. En vue de perfectionner ce type d'interaction, [Hagedorn et Döllner \[2008\]](#) décrivent un ensemble d'interactions gestuelles permettant à l'utilisateur de décrire l'itinéraire qu'il souhaite voir parcourir par la caméra virtuelle.

Le besoin grandissant en interactivité et en navigation entre représentations soulève la question de la création de transitions graphiques. Ce problème est abordé par les travaux décrits dans cette section sous l'angle de la navigation dans l'espace géographique lors d'un déplacement de la position ou du zoom de l'utilisateur. Un défi similaire est posé pour la navigation entre représentations cartographiques de différents styles. Dans ce cas, les solutions à apporter sont d'ordre graphique et concernent la manipulation et l'adaptation des représentations entre lesquelles l'utilisateur souhaite naviguer. Pour mieux identifier les représentations privilégiées de l'utilisateur en termes de covisualisation, nous avons mené une enquête sur un panel de sites internet.

1.4 Enquête sur l'utilisation des fonds cartographiques et orthophotographiques

La très grande diversité observée en termes de représentations cartographiques mixtes et d'outils de covisualisation, nous invite à analyser l'utilisation qui est faite des données et représentations cartographiques pour créer des représentations mixtes par le biais d'un interface de visualisation. Pour cela, nous avons analysé différents sites internet présentant une interface de visualisation cartographique. Notre objectif est de déterminer comment les fonds orthophotographiques, cartographiques et les vecteurs sont utilisés par défaut dans ces sites internet. Cette partie reprend certains résultats publiés dans [Hoarau \[2012\]](#).

L'approche générale adoptée pour réaliser cette enquête consiste à analyser la configuration mise en place par défaut par les concepteurs des différents sites analysés, dans le but de **dégager des préférences de conception cartographique**. Existe-t-il des configurations de visualisation privilégiées ou des associations favorites entre données utilisées d'une part et tâche(s) cartographique(s), profil utilisateur ou thématique principale du site d'autre part ? En particulier, l'objectif de cette enquête est d'identifier a priori, si elle existe, **une façon optimale ou partagée de créer des représentations mixtes** en utilisant des données cartographiques préalablement symbolisées et des orthophotographies, puisque ce sont les deux types de fonds de cartes les plus souvent disponibles.

Dans un premier temps, nous détaillons le protocole d'enquête (Cf. §1.4.1), puis nous décrivons un portrait général des sites étudiés (Cf. §1.4.2) avant de présenter des résultats sur la conception des représentations mixtes fournies par défaut sur ces sites web (Cf. §1.4.3) avant d'établir le dernier constat de ce chapitre (Cf. §1.4.4).

1.4.1 Méthodologie : sites étudiés et informations collectées

Nous avons sélectionné des sites web construits à partir de l'API du Géoportail. Ce choix est justifié par une volonté d'analyser des sites qui ont été construits à partir d'une même bibliothèque logicielle pour éviter une possible inégalité de fonctionnalités disponibles entre les différentes API cartographiques existantes. De plus, c'est l'API du Géoportail qui a été choisie parmi les

différentes API cartographiques afin de pouvoir bénéficier de statistiques disponibles en interne à l'IGN concernant la fréquentation des sites et la fréquence d'utilisation des différentes données.

L'API du Géoportail est une bibliothèque logicielle basée sur l'API OpenLayers, permettant d'intégrer une interface de visualisation cartographique à un site web, et donnant accès à des données de référence de l'IGN et de ses partenaires, ainsi qu'à des services de géolocalisation ou encore de consultation de données Inspire. De nombreux outils interactifs peuvent être intégrés à une interface de visualisation créée avec l'API du Géoportail, comme des outils de déplacement, de zoom, de sélection d'objets, de dessin de nouveaux objets, de mesures de distances ou de surfaces ou encore de modification de la visibilité, de l'ordre de superposition ou de la transparence des couches de données mises à la disposition de l'utilisateur. De plus, par le biais de l'API, le concepteur peut permettre l'accès à de nombreuses données variées comme la pyramide cartographique constituée des différentes cartes topographiques de l'IGN, différentes couvertures orthophotographiques (BD ORTHO®, orthophographie littorale, orthophotographie historique, orthophotographie satellitaire, etc.), ainsi que des données thématiques (carte géologique, parcelles cadastrales, zones naturelles protégées, occupation du sol, lignes électriques, etc.) et topographiques (hydrographie, végétation, routes, limites administratives, etc.).

Matériel Les sites sélectionnés ont d'abord été choisis parmi ceux de la galerie¹¹⁹ de l'API du Géoportail qui présente un panel de sites illustrant les possibilités offertes par l'API. Puis la liste a été complétée grâce à la base de statistiques de fréquentation à laquelle nous avons accès, afin de construire un panel suffisant pour réaliser une analyse statistique. 45 sites ont ainsi été sélectionnés pour l'enquête : la liste complète des sites étudiés est disponible en annexe B.

Informations collectées Les informations collectées sur les sites web étudiés pour l'enquête peuvent être regroupées en cinq grandes familles qui ont été représentées par différentes couleurs sur la figure 1.38 présentant un exemple de collecte d'information sur le site web de l'ordre des géomètres experts.

- Des **informations assez généralistes** ont tout d'abord été collectées pour répertorier les sites et en dessiner la portée générale. Ces informations sont indiquées en rose sur la figure 1.38. Il s'agit de décrire l'identité du site par son nom, son adresse URL, l'organisme qui l'a mis en place, etc. mais également de dresser un portrait général du site en répertoriant sa thématique principale (développement durable, tourisme, histoire, culture, éducation, géomatique, immobilier, randonnées, etc.), son public cible (grand public, public professionnel spécialisé, etc.). De plus, quelques informations techniques ont également été collectées concernant l'API utilisée comme le numéro de version ou la technologie de développement (javascript, flash, etc.).
- La **représentation cartographique proposée par défaut** à l'utilisateur. Ces informations sont indiquées en bleu sur la figure 1.38. Différentes informations ont ainsi été répertoriées concernant le fond de carte, sa composition (une carte, une orthophoto ou un enchevêtrement des deux), la visibilité, la transparence et l'ordre de superposition des représentations cartographiques disponibles, etc. Cet inventaire répond à un double objectif de description : d'une part, il permet de décrire ce que l'utilisateur voit quand il ouvre l'application cartographique étudiée, et d'autre part, il permet de savoir comment cette représentation a été

¹¹⁹La galerie de sites web de l'API du Géoportail est consultable à l'adresse suivante : <http://api.ign.fr/galerie>.

construite. De plus, les paramètres de configuration généraux de la visualisation comme la taille de l'espace réservé à la carte, l'échelle par défaut, la localisation par défaut, etc. ont également été relevés.

- Les **données thématiques superposées au fond de carte**. Ces informations sont indiquées en bleu foncé sur la figure 1.38. La provenance de ces données (mises à disposition par l'API, appelées depuis un service web, ou ajoutées par le concepteur ou l'utilisateur), leur thématique, leur format, leur symbolisation, leur type d'implantation ont ainsi été inventoriés pour être analysés au regard du fond de carte auquel elles sont superposées. De plus, la présence d'outils d'import ou d'export de données ou de représentations a également été relevée.
- Les **outils interactifs mis à disposition de l'utilisateur** dans l'interface de visualisation qui lui est proposée par défaut. Ces informations sont indiquées en violet sur la figure 1.38. Ces informations ont été collectées pour juger le potentiel de personnalisation qui est offert à l'utilisateur : peut-il choisir, modifier, personnaliser, enrichir, adapter la représentation cartographique qu'il visualise ? Ainsi, les outils de modification de l'ordre de superposition, de la transparence, de la visibilité des couches ou de modification de la taille de l'interface de visualisation cartographique ont été listés, de même que la présence d'outils de numérisation ou de symbolisation de données.
- Enfin, des informations sur la **fréquentation des sites** étudiés et sur l'**usage des différentes données** ont été extraites d'une base de données interne répertoriant les différents accès aux données mises à disposition par l'API du Géoportail. Les informations collectées ont été observées durant le mois de janvier 2012. En conséquence, seules les statistiques de fréquentation et d'usage du mois de janvier ont été extraites et analysées. En effet, l'objectif n'était pas d'observer une éventuelle évolution de l'usage des différentes données mais bien de construire une image de la fréquentation et de l'utilisation à un moment donné afin de les analyser au regard des choix de conception précédemment décrits.

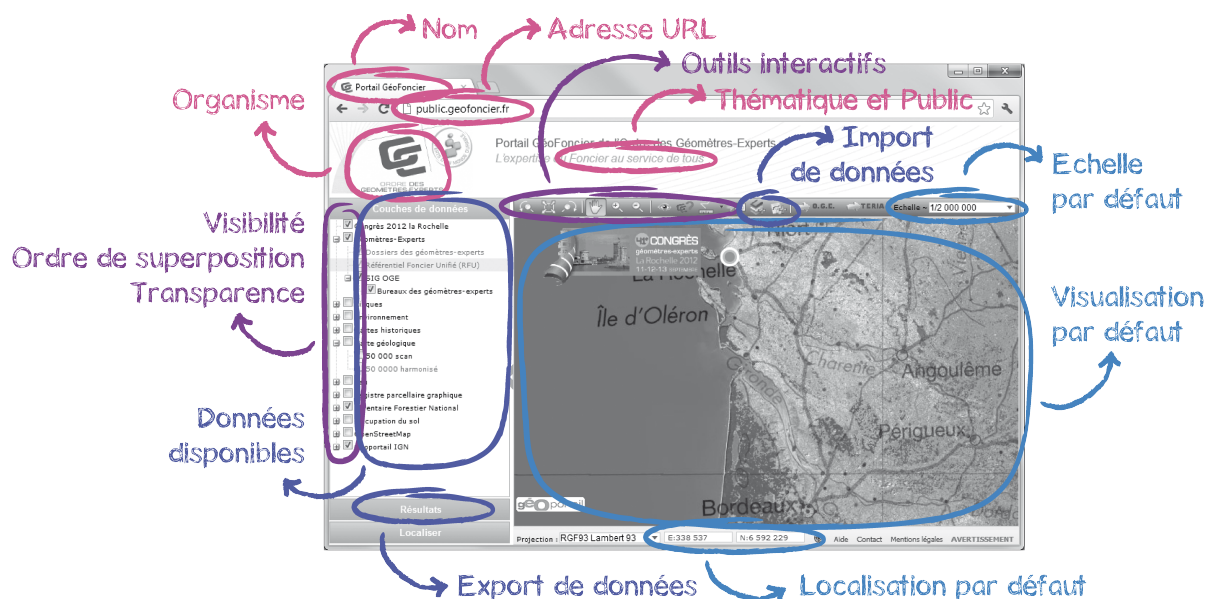


FIGURE 1.38 : Informations collectées

1.4.2 Portrait général du panel de sites web étudié

Une première analyse de la répartition des thématiques principales et des types de publics visés laisse présager une grande diversité dans les sites sélectionnés pour l'enquête (Cf figure 1.39).

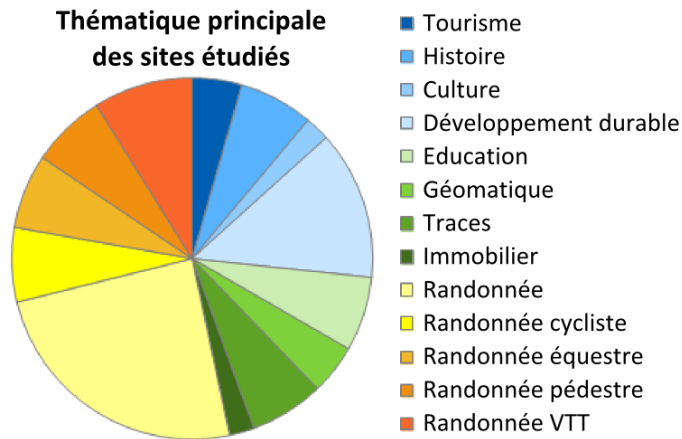


FIGURE 1.39 : Diversité des sites sélectionnés.

L'observation des fonds de carte proposés par défaut confirme la diversité visuelle du panel de sites étudié (Cf. figure 1.40). Les fonds proposés sont pratiquement toujours des représentations créées par l'IGN, ce qui était prévisible car la valeur ajoutée de l'API du Géoportail est de donner accès aux données de l'IGN. Il est donc naturel que ces données de référence soient utilisées en grande majorité sur des sites construits avec l'API correspondante. Plus particulièrement, la qualité de rédaction cartographique de la pyramide cartographique IGN est très certainement une motivation majeure d'utilisation de l'API du Géoportail pour concevoir une application cartographique, ce qui explique que la carte IGN soit proposée par défaut par une majorité de sites (58% du panel).

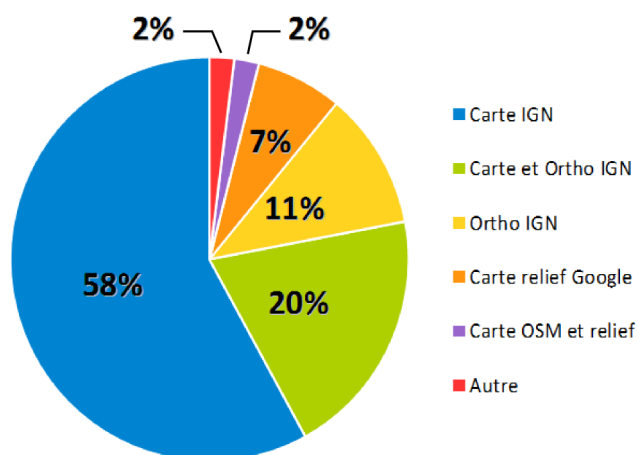


FIGURE 1.40 : Fonds de cartes proposés par défaut dans les sites étudiés.

Cependant, quelques sites du panel proposent tout de même par défaut des fonds issus d'autres producteurs (OSM et GoogleMaps) en faisant appel à des services web. C'est en réalité

le cas dès lors que la visualisation du relief est nécessaire. En effet, une couche de données altimétriques est disponible par le biais de l'API mais sous la forme d'un MNT coloré, et non pas d'un estompage cartographique en noir et blanc. Cette couche n'est donc pas compatible avec une utilisation au sein d'une représentation cartographique mixte.

Enfin, on note que, parmi les données accessibles par le biais de l'IGN, seule la pyramide cartographique et le fond orthophotographique sont proposés comme fond de carte par défaut. Cela nous permet d'identifier une première préférence de conception. En effet, d'autres données auraient pu être proposées comme fond comme par exemple une carte géologique ou lithographique, ou encore des cartes historiques comme la carte de Cassini ou celle de l'Etat-Major. La figure 1.41 présentant les parts des chargements des différentes données par les utilisateurs pour l'ensemble des sites du panel sur la période d'étude montre d'ailleurs que ces autres fonds de cartes potentiels sont bien mis à disposition et parfois visualisés par l'utilisateur, mais en faible proportion comparé aux deux fonds de carte principaux : la carte topographique et l'orthophotographie.

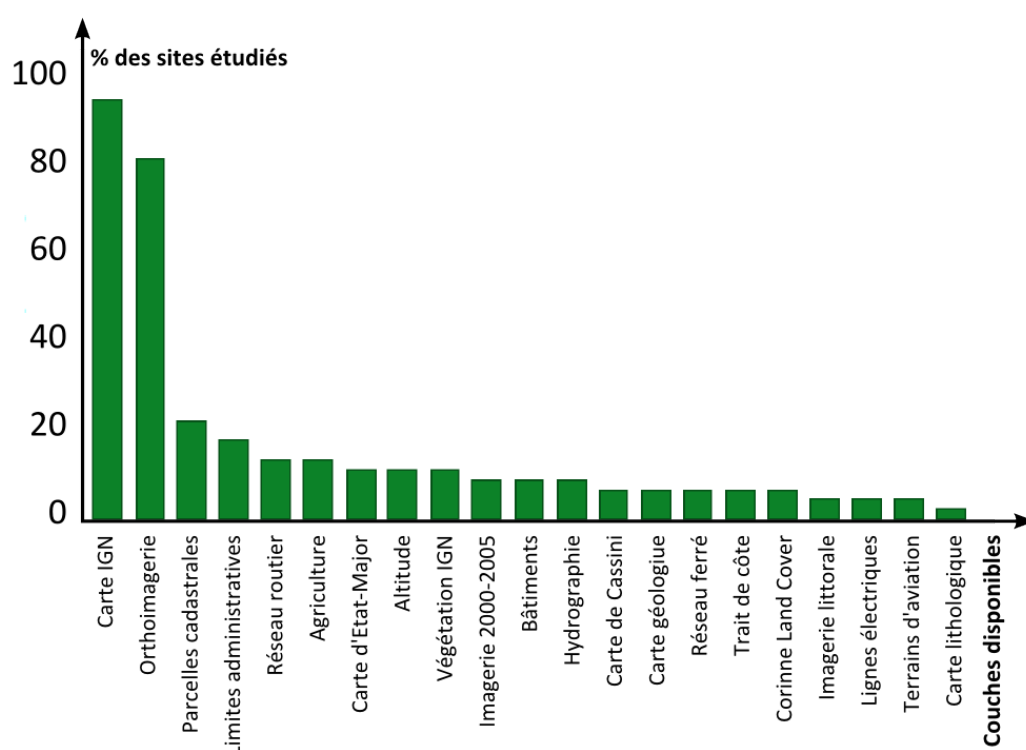


FIGURE 1.41 : Disponibilité des couches au sein du panel de sites.

Les fonds cartographiques préférés pour construire une représentation cartographique mixte sont la carte topographique et l'orthophotographie. L'enjeu de cette enquête est de déterminer comment ces deux fonds sont présentés et combinés pour déterminer s'il existe un consensus de conception cartographique à partir de ces deux fonds favorisés malgré la diversité applicative du panel de sites.

1.4.3 Analyse des représentations cartographiques mixtes proposées

Les représentations cartographiques utilisant des fonds cartographiques et/ou orthophotographiques peuvent être classées selon la représentation cartographique qui est placée dessous et selon le niveau de mélange de ces fonds. En effet, l'utilisation de différents niveaux de transparence engendre des mélanges plus ou moins importants des représentations cartographiques superposées, ce qui donne lieu à la création de fonds de type :

- **non mixtes** : lorsque la représentation de base est opaque et celle qui est superposée totalement transparente (opacité à 0%),
- **peu mixtes** : lorsqu'une représentation de base est opaque et celle qui est superposée très transparente (opacité inférieure à 50%),
- **mixtes** : lorsque la représentation de base est opaque et celle qui est superposée légèrement transparente (opacité supérieure à 50%),
- **mixtes estompés** : lorsque les deux représentations sont transparentes.

Les différentes catégories sont illustrées par des échantillons de représentations cartographiques à la figure 1.43. Ces échantillons constituent un argument supplémentaire pour affirmer la diversité visuelle que l'on peut obtenir uniquement par superposition d'une carte topographique et d'une orthophotographie avec différentes combinaisons et des niveaux de transparence variés. Cependant, cet inventaire nous permet également d'identifier une grande similitude graphique entre des fonds construits avec des configurations bien différentes, comme c'est le cas pour les échantillons n° 4 et n° 5 par exemple. Le double point de vue adopté pour décrire la représentation cartographique par défaut (selon sa conception, et selon le résultat graphique) nous permet ainsi d'identifier un frein potentiel à la construction de représentations mixtes. En effet, le fait que différentes configurations de visualisation puissent aboutir à un résultat graphique identique apparaît comme potentiellement contre-intuitif et déroutant lors de la configuration d'une représentation cartographique mixte.

Par ailleurs, la répartition des représentations cartographiques proposées par défaut dans notre panel d'étude présente une première moitié de représentations non mixtes et une autre moitié de représentations mixtes (Cf. figure 1.42). L'utilisation de représentations cartographiques mixtes n'est donc pas anecdotique. De plus, toutes les catégories de mixtes sont représentées dans le panel dans des proportions du même ordre de grandeur, ce qui ne va pas dans le sens d'un consensus de conception.

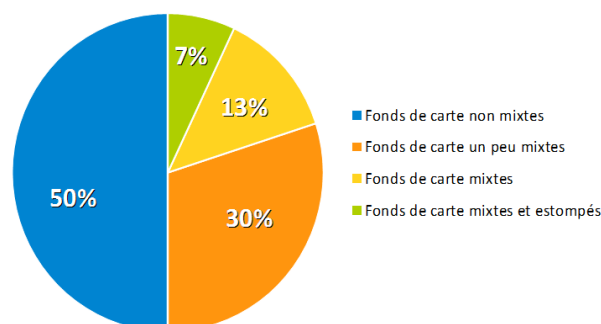


FIGURE 1.42 : Répartition des représentations selon les différents types de fonds.

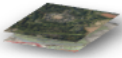



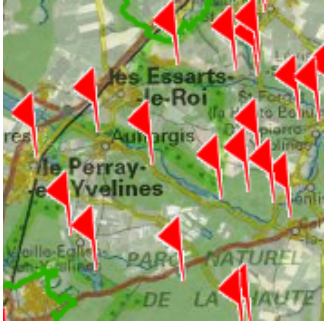


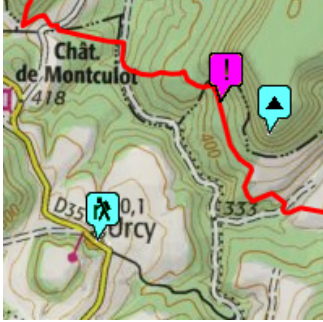
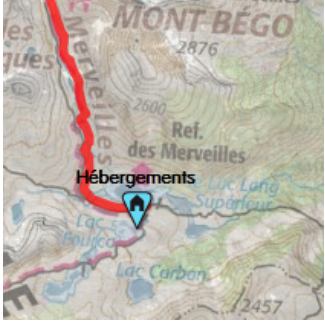

	<div>Orthophoto superposée sur un fond Cartographique</div> <div></div>	<div>Carte superposée sur un fond Orthophotographique</div> <div></div>
<div>Fonds non mixtes</div> <div>1 couche opaque</div> <div>1 couche transparente</div>	<div></div> <div>1</div> <div>Carte 100%</div> <div>Ortho 0%</div>	<div></div> <div>2</div> <div>Ortho 100%</div> <div>Carte 0%</div>
<div>Fonds peu mixtes</div> <div>1 couche opaque</div> <div>1 couche très transparente</div>	<div></div> <div>3</div> <div>Carte 100%</div> <div>Ortho 50%</div>	<div></div> <div>4</div> <div>Ortho 100%</div> <div>Carte 30%</div>
<div>Fonds mixtes</div> <div>1 couche opaque</div> <div>1 couche légèrement transparente</div>	<div></div> <div>5</div> <div>Carte 100%</div> <div>Ortho 80%</div>	<div></div> <div>6</div> <div>Ortho 100%</div> <div>Carte 70%</div>
<div>Fonds mixtes estompés</div> <div>2 couches transparentes</div>	<div></div> <div>7</div> <div>Carte 50%</div> <div>Ortho 30%</div>	<div></div> <div>8</div> <div>Ortho 70%</div> <div>Carte 60%</div>

FIGURE 1.43 : Catégories de visualisations rencontrées

Afin d'identifier une éventuelle configuration consensuelle pour créer une représentation cartographique mixte, nous avons étudié les configurations des représentations cartographiques au regard du résultat graphique visualisé par l'utilisateur (Cf. figure 1.44).

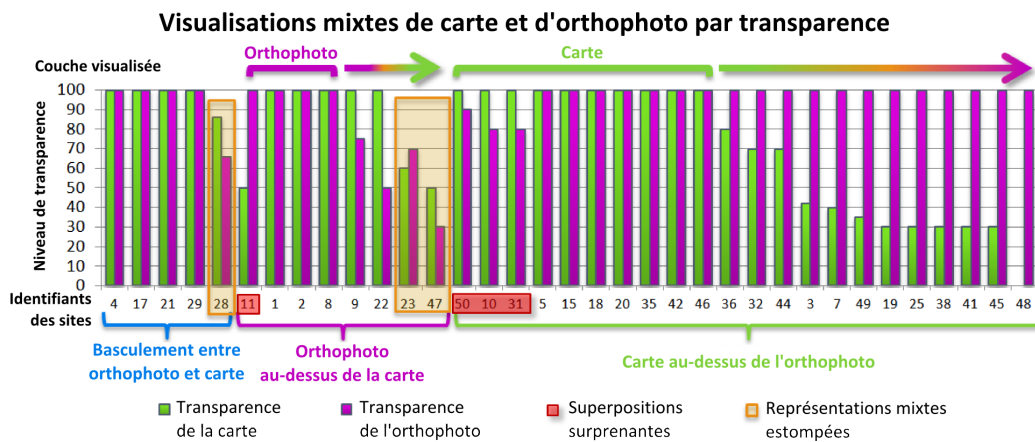


FIGURE 1.44 : Configurations et niveaux de transparence des représentations utilisées pour créer des représentations mixtes.

La figure 1.44 présente ainsi les niveaux de transparence des deux représentations pour tous les sites présentant des représentations cartographiques mixtes, et indique ce que l'utilisateur voit (c'est-à-dire l'orthophoto, la carte, ou un mélange des deux) au-dessus du graphique et l'ordre des couches au-dessous du graphique.

Cette figure permet d'identifier des cas de superposition surprenante, pour lesquels une couche opaque recouvre la deuxième représentation. Cette dernière avait été configurée en termes de transparence mais demeure invisible car masquée par la représentation opaque qui lui est superposée.

De plus, on note également que les représentations mixtes estompées sont peu représentées, peut-être parce qu'elles sont encore plus difficiles à configurer. En effet, si on applique de la transparence aux deux représentations superposées entre elles et à un fond blanc, chacune sera moins visible, et le résultat sera probablement illisible.

Cette description détaillée des configurations des représentations cartographiques du panel de l'enquête démontre qu'il n'existe pas de consensus de conception de représentations cartographiques mixtes à partir d'une carte et d'une orthophotographie. En effet, les résultats graphiques sont également très variés et on retrouve presque autant de configurations différentes que de sites étudiés.

1.4.4 Un troisième constat : aller au-delà de la transparence

Cette enquête est également l'occasion de questionner la méthode de conception par superposition de fonds de carte en utilisant la transparence pour mélanger ces fonds et créer un fond de carte mixte. Cette méthode de rendu est-elle fréquente, efficace, consensuelle? Le dernier constat de ce chapitre, établi au regard des résultats de notre enquête, est celui de l'inefficacité de l'utilisation de la transparence pour superposer deux représentations initialement prévues pour être auto-suffisantes.

D'une part, cette méthode de conception peut engendrer des mélanges illisibles, dans lesquels on ne reconnaît plus ni la carte ni l'orthophotographie (Cf. figure 1.45). Le potentiel de la

transparence comme méthode de mélange est indéniable. En revanche, elle ne doit pas être utilisée comme une solution de symbolisation globale d'une couche.

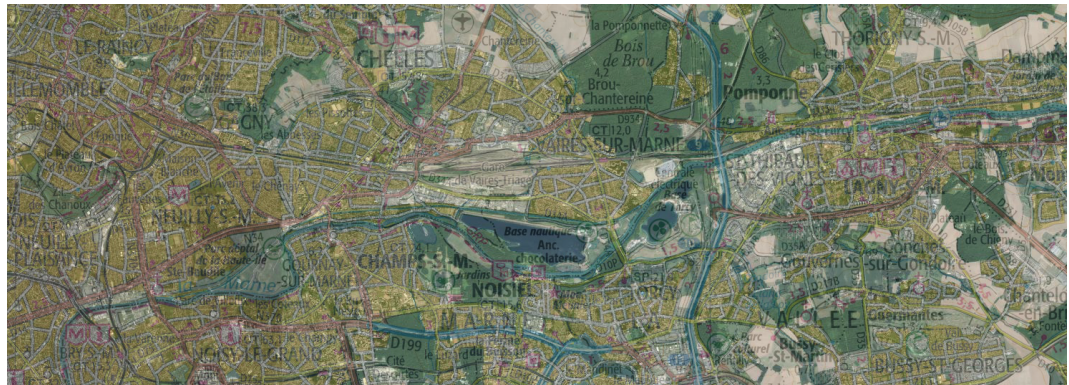


FIGURE 1.45 : Exemple de représentation mixte construite par superposition d'une carte opaque et d'une orthophotographie à 80% d'opacité.

D'autre part, l'enquête met en évidence le besoin de méthode spécifique de conception de représentation cartographique mixte basée sur un fond orthophotographique. L'apport d'information engendré par cette donnée complémentaire aux traditionnelles données topographiques est lui aussi incontestable. Cependant, il faut prendre en compte la nature différente de l'information qu'elle contient, et l'impact visuel hétérogène et saillant que provoque son intégration dans une représentation cartographique mixte.

L'analyse de ce panel de sites construits à partir de l'API du Géoportail nous permet de mettre en évidence le besoin d'une méthode de conception spécifique aux représentations mixtes. Cette méthode aura pour objectif de conserver les informations pertinentes des représentations mélangées, tout en assurant la lisibilité globale de la représentation cartographique en devenir.

1.5 Objectif de la thèse : concevoir des représentations intermédiaires pour naviguer d'une carte topographique à une orthophotographie

Dans ce chapitre, nous avons dressé un panorama des données géographiques et des représentations cartographiques existantes afin d'en percevoir la diversité et la complémentarité. Cet inventaire nous a permis de décrire le concept de représentation cartographique mixte, c'est-à-dire conçue à partir d'autres représentations cartographiques et données hétérogènes. L'apparition de ce type de représentation cartographique innovant a élargi davantage l'espace des possibles cartographiques.

Tout naturellement, on observe également l'apparition d'outils de géovisualisation, et notamment de covisualisation, proposant de parcourir cet espace des représentations cartographiques. Pour l'instant, les outils existants permettent généralement de passer d'une représentation à une autre ou d'en juxtaposer deux au sein d'une même interface de visualisation. Mais il semble

inévitable que plus de deux représentations seront visualisées conjointement dans le futur.

En parallèle, notre enquête sur l'utilisation des fonds cartographiques et orthophotographiques au sein d'une interface de visualisation nous a permis d'identifier deux représentations cartographiques phares, fréquemment utilisées pour concevoir des fonds de cartes mixtes : la carte topographique et l'orthophotographie. Cependant, nous avons également mis en évidence un manque flagrant de consensus dans la conception de représentations cartographiques mixtes. Le risque encouru en termes de qualité cartographique en utilisant une simple superposition par transparence s'avère trop important et rend nécessaire la mise en place d'une méthode de conception d'une représentation cartographique mixte spécifique, c'est-à-dire plus efficace pour mélanger ces deux représentations cartographiques de référence et prenant mieux en compte les spécificités de l'utilisation d'un fond orthophotographique. La diversité de l'information véhiculée et de l'impact visuel offerte par ces deux représentations nous incite également à prévoir une méthode de conception permettant à l'utilisateur de naviguer parmi cet ensemble de représentations afin de se positionner à l'intermédiaire de plusieurs représentations cartographiques, créant ainsi une continuité au sein de l'espace des possibles cartographiques.

Dans ce contexte cartographique et technologique en pleine évolution, le sujet de cette thèse est de proposer une méthode de conception de représentations cartographiques intermédiaires entre une carte topographique et une orthophotographie. Ce travail vise à permettre la navigation entre ces deux types de représentations de référence. Pour cela, il s'agira de **concevoir des représentations intermédiaires entre ces deux extrêmes topographiques**, afin de réduire l'écart visuel et informationnel qui les sépare. Ces représentations intermédiaires seront conçues **en tant que représentations cartographiques mixtes** en cela qu'elles seront composées de représentations cartographiques hétérogènes et construites par covisualisation de données. De plus, elles formeront un **continuum de styles plus ou moins réalistes ou abstraits** grâce auquel l'utilisateur sera capable de naviguer de façon progressive, continue et fluide entre ces deux représentations afin de choisir l'état intermédiaire qui lui convient. L'enjeu est donc triple : il nous faudra préserver à la fois la lisibilité et l'homogénéité de chaque état intermédiaire et la continuité visuelle entre ces états intermédiaires.

Notre approche pour concevoir ces représentations cartographiques intermédiaires est de s'inspirer des méthodes de conception de représentations mixtes, tout en tirant profit des méthodes de rendus issues de l'informatique graphique afin de gérer le niveau de réalisme de chaque représentation intermédiaire. La notion de degré de réalisme et d'abstraction d'une représentation apparaît en effet comme un aspect fondamental des représentations à prendre en compte lors de leur agrégation pour créer une représentation mixte. Le chapitre suivant décrit l'état de l'art des différents domaines inhérents à cette approche (cartographie et géovisualisation, informatique graphique et rendu expressif, perception et cognition utilisateur).

Chapitre 2

Verrous pour la conception de représentations cartographiques mixtes et réalistes

UNE CARTE établit un lien entre les éléments du monde réel qu'elle représente et les éléments graphiques qu'elle présente. Pour cela, le cartographe utilise *la légende cartographique* comme clé de lecture de la carte, un élément pivot décrivant ces associations entre les symboles graphiques utilisés dans la carte et les objets auxquels ils font référence. De plus, la carte est le support des mécanismes perceptifs et cognitifs qui permettront (ou pas) à l'utilisateur de comprendre ou manipuler correctement les informations et connaissances transmises par le cartographe. Par exemple, les bâtiments peuvent être représentés par des petits carrés gris pour faire penser à des maisons individuelles. Le cartographe ou le concepteur d'une carte doit donc anticiper l'interprétation et l'utilisation qui sera faite de la représentation graphique en devenir, dans le but de garantir la bonne extraction d'informations ou de connaissances. L'adéquation de cette information extraite sera d'ailleurs à évaluer au regard de la réalité terrain mais également de la volonté initiale du cartographe. En effet, celui-ci peut chercher à tromper ou influencer l'utilisateur [Monmonier, 1993] ou encore à promouvoir une idée ou une émotion [Muehlenhaus, 2013].

En tant qu'activité de **conception cartographique**, la conception de représentations cartographiques mixtes est un processus sollicitant des connaissances et compétences variées, faisant interagir des acteurs de différents profils (cartographes, utilisateurs, producteurs) et soumis à des contraintes fortes. Il vise à produire une représentation du monde permettant à l'utilisateur de lire une information ou extraire une connaissance. Cela implique pour le cartographe de prendre en compte la relation de l'utilisateur à la représentation et à la compréhension du territoire qu'il dégage de la lecture de celle-ci. Les travaux en conception cartographique se sont donc inspirés des fondements de la sémiologie pour établir des règles graphiques de grammaire permettant de garantir la monosémie du message cartographique [Bertin, 1967]. Ces bases sémiologiques sont remises en question par l'utilisation de nouveaux types de données et l'existence de nouvelles méthodes de rendu graphique.

En tant qu'activité de **conception d'une représentation mixte**, la conception de représentations cartographiques mixtes ajoute de la complexité technique mais aussi théorique en termes

de rendu graphique : combiner des représentations implique de prendre en compte leur propre méthode de conception et de les rendre compatibles. L'utilisation d'un matériau graphiquement différent et plus complexe invite à étendre les principes de conception cartographique. D'une part, des travaux en rendu visuel visent à les adapter aux nouveaux matériaux de base que sont les orthophotographies et autres données hétérogènes. D'autre part, des travaux en visualisation entendent gérer la complexité générée par la fusion ou la covisualisation de représentations cartographiques différentes. Enfin, dans le but de garantir la lisibilité de telles représentations mixtes, des travaux en rendu et en cognition cherchent à définir, contrôler et évaluer le degré de réalisme et d'abstraction d'un élément graphique ou de l'ensemble de la représentation.

Dans ce chapitre, nous décrivons les implications d'une application des principes de la sémiologie graphique aux fonds orthophotographiques et les propositions existantes de méthodes de symbolisation cartographique dérivant de cette approche (Cf. §2.1). Puis, nous détaillons les méthodes permettant le contrôle du degré de réalisme et d'abstraction d'une représentation cartographique ou non (Cf. §2.2). Enfin, nous présentons trois types de méthodes de rendu mixtes dont nous souhaitons nous inspirer pour mettre en place notre approche générale (Cf. §2.3). Ainsi, nous dressons un état de l'art pluridisciplinaire en matière de conception de représentations cartographiques mixtes et réalistes qui se situe au carrefour de la cartographie, des sciences de l'information géographique et de l'informatique graphique.

2.1 Appliquer la sémiologie (carto-)graphique aux fonds orthophotographiques

L'enjeu de ce paragraphe est de comprendre les spécificités d'une application des principes de la sémiologie graphique aux fonds orthophotographiques. Pour cela, nous décrivons dans un premier temps les mécanismes perceptifs et cognitifs sous-jacents ayant conduit à l'établissement des principes de la théorie cartographique en ce qui concerne la conception de légende (Cf. §2.1.1). Dans un second temps, nous décrivons les travaux visant à étendre ces deux aspects théoriques afin de prendre en compte les spécificités de l'utilisation de données orthophotographiques (Cf. §2.1.2).

2.1.1 Conception de légende et sémiologie graphique

Les travaux en cartographie se sont attachés à décrire et modéliser les moyens graphiques qui étaient à leur disposition et à trouver une méthode de conception pour utiliser au mieux ces outils graphiques. Puis, les travaux en cartographie se sont intéressés aux mécanismes perceptifs et cognitifs en jeu dans la lecture d'une carte afin de les prendre en compte au mieux en amont du processus de conception cartographique.

Qu'est-ce qu'un signe graphique ? La définition de ce qu'est un signe graphique a été étudiée dans de nombreux domaines visuels avec la même volonté de définir les objets graphiques élémentaires susceptibles d'être perçus par un utilisateur. Ces études se fondent généralement sur les principes de perception visuelle définissant les caractéristiques minimales pouvant être perçues par un être humain comme la taille minimale d'un signe, l'espacement minimal entre deux signes, la différence minimale entre deux couleurs, etc.

Dans le domaine artistique, les écrits théoriques sur la peinture de Kandinsky [1991] s'attachent à décrire les éléments géométriques (le *point* et la *ligne*) composant une peinture lorsqu'ils sont représentés sur un support physique, qu'il désigne comme étant le *plan originel*. Il les analyse selon l'effet intérieur qu'ils produiront sur le spectateur, c'est-à-dire selon un point de vue subjectif et sensible lorsqu'on les regarde en se fiant plutôt à sa "*première impression*". C'est donc bien une approche à la fois perceptuelle, artistique et émotionnelle. Ces principes ont inspiré de nombreux chercheurs et artistes visant à théoriser leur pratique graphique. Sauvet [1990] les combine par exemple à la théorie sémiologique de Ferdinand de Saussure pour décrire les éléments graphiques de l'art mobilier paléolithique. De même, Hutzler et al. [1998] adaptent la théorie de Kandinsky pour la visualisation de Systèmes Multi-Agents (SMA).

En cartographie, Bertin [1967] décrit les signes graphiques comme étant des *taches* identifiées grâce à un instant de perception. Il s'appuie lui-aussi sur les principes de perception visuelle pour définir la tache comme un élément minimal susceptible d'être perçu par un être humain. MacEachren [1995, Chapitre 3, "*How Maps are seen*"] étend la notion de signe graphique en s'appuyant sur les principes de la théorie de la Gestalt (proximité, similarité, mouvement commun, stabilité, continuité, fermeture, simplicité, familiarité, etc.). Il décrit les propriétés nécessaires à la détection, la discrimination, l'ordonnancement et l'évaluation quantitative des objets, des phénomènes et des structures dans la carte. La présence ou les propriétés d'un contour, les caractéristiques de contrastes (couleur, valeur, taille) sont pour l'auteur autant d'indices rendant un objet graphique plus ou moins saillant et permettant de le distinguer du fond de carte et des autres objets.

Les variables visuelles : leviers graphiques pour symboliser les signes graphiques Après avoir défini ce qu'est un signe graphique, l'étape de théorisation suivante consiste généralement à décrire les mécanismes graphiques permettant de représenter ces signes et le potentiel expressif de ces leviers. Kandinsky décrit les propriétés des éléments géométriques qu'il a identifiées : les points peuvent avoir différentes formes et couleurs, une ligne peut être droite, courbe ou brisée, etc. Il confère à ces propriétés différents pouvoirs expressifs, qui, utilisés à bon escient par l'artiste peintre, seront la clé pour créer une œuvre qui provoquera l'émotion recherchée chez le spectateur.

En cartographie, Bertin [1967] identifie sept variables visuelles, qu'il définit comme des moyens graphiques de différencier deux signes graphiques : ce sont les deux dimensions de la position, la forme, la couleur, la valeur, la taille, l'orientation et le grain. Bertin [1967] identifie également la notion de mode d'implantation : selon lui, un signe graphique peut être implanté au sein d'une carte sous la forme d'un point, d'une ligne ou d'un polygone. Cela correspond aux primitives géométriques principales des données vectorielles¹. La figure 2.1 illustre la mise en œuvre par Bertin [1967] des variables visuelles selon le mode d'implantation. Ces variables visuelles initiales ont été complétées par de nombreux chercheurs en cartographie [MacEachren, 1995, p. 270-280] puis étendues aux cartes en reliefs, aux cartes animées et à l'utilisation du son dans les cartes interactives [MacEachren, 1995, p. 280-290].

Les recherches théoriques sur les signes graphiques en cartographie poursuivent toutes un

¹Attention cependant, le mode d'implantation est défini pour une donnée cartographique, c'est-à-dire ayant vocation à être représentée sur un support graphique. Le mode d'implantation d'une donnée cartographique ne correspondra pas nécessairement au type géométrique de la donnée géographique initiale. En effet, un des principes de la généralisation cartographique vise à adapter le mode d'implantation d'un objet selon l'échelle ; par exemple, une ville sera souvent représentée par un polygone à grande échelle et par un point à petite échelle.

double objectif : décrire l'utilisation des variables visuelles en cartographie et leur capacité à transmettre une relation sémantique entre deux signes graphiques. En effet, les auteurs s'attachent d'une part à décrire comment le cartographe pourra faire varier la couleur, la forme, la taille, etc. d'un signe graphique pour en faire un symbole cartographique. Bertin [1967] définit par exemple pour chacune de ces variables visuelles ce qu'il appelle la longueur de la variable, qu'il définit comme étant le nombre de paliers qu'il sera possible de distinguer. Pour cela, il se fonde également sur la théorie de la perception visuelle qui préconise des seuils de différenciation minimaux (seuils de taille, d'épaisseur, de distance, d'orientation relative, etc.). D'autre part, la capacité des différentes variables visuelles à associer, différencier, ordonner ou quantifier une information est étudiée dans le but de définir des bonnes pratiques d'utilisation des variables visuelles selon la nature des données à cartographier (quantitative ou qualitative). Dans le même esprit, les travaux récents en visualisation d'information de Demiralp *et al.* [2014] visent à quantifier expérimentalement la perception des différences dues à l'utilisation des différentes variables visuelles (qu'ils nomment noyaux de perception ou "perceptual kernels") ou à la combinaison de deux variables visuelles afin de déterminer leur potentiel perceptuel et de maximiser le pouvoir discriminant d'une palette de symboles.

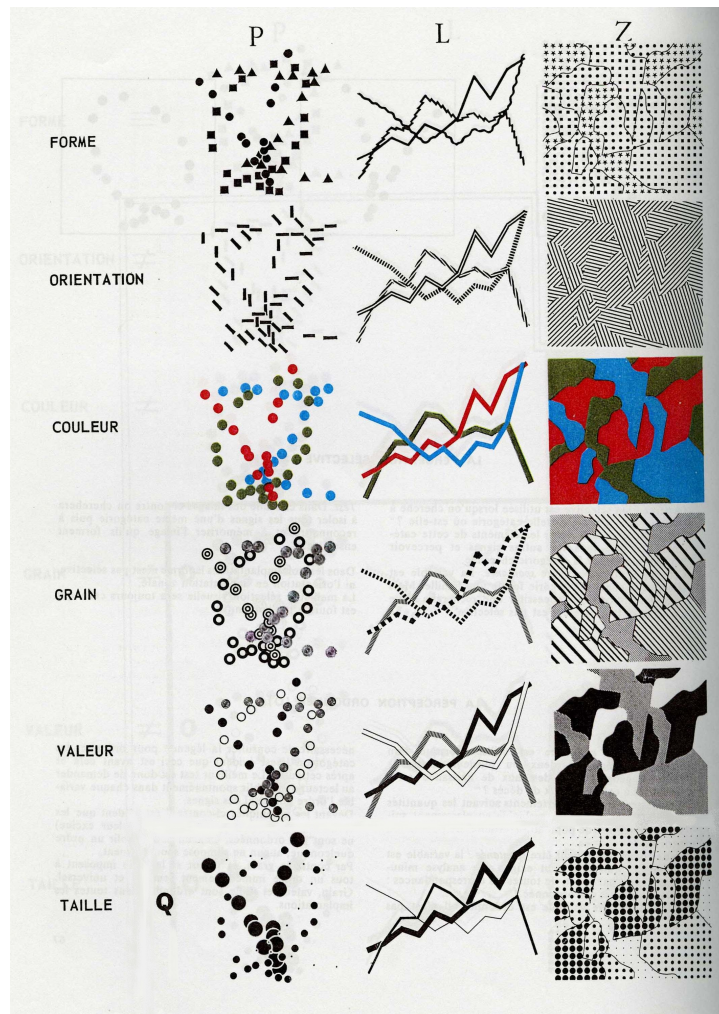


FIGURE 2.1 : Mise en œuvre des sept variables visuelles de Bertin selon les trois modes d'implantation. [Bertin, 1967]

A notre connaissance, il n'existe pas de travaux théoriques spécifiques dans le domaine de la cartographie et de la géovisualisation visant à étendre les notions de signe graphique et de variable visuelle à la lecture de photographies aériennes ou satellitaires. Néanmoins, étant donné l'écart visuel important et la différence de nature de l'information contenue, il est légitime de remettre en question ces notions pour un fond orthophotographique :

- Qu'est-ce qu'un signe graphique dans une orthophotographie ? C'est-à-dire, quels sont les objets graphiques élémentaires que l'utilisateur perçoit dans une orthophotographie ?
- Quels sont les moyens graphiques et les méthodes de rendu nous permettant de dessiner ces signes graphiques ?

La **sémiologie** est la science qui étudie les signes, leur utilisation et leur compréhension au sein d'un système de communication codifié. A l'origine, elle a été théorisée sous l'angle de la linguistique, puis ses domaines d'application se sont étendus aux domaines visuels et artistiques.

Associations signe-sens Afin de mieux comprendre les mécanismes perceptifs et cognitifs, de nombreux chercheurs en cartographie se sont inspirés des principes de la sémiologie pour théoriser les liens existants entre les symboles cartographiques, les objets du monde réel et les concepts associés permettant au cartographe et à l'utilisateur de la carte de partager une communauté de sens. MacEachren [1995, partie II] détaille ces différentes approches en cartographie après avoir décrit les différentes approches en sémiologie. Il se fonde sur un article de Nöth [1990] qui présente les deux approches fondamentales en sémiologie et les différents vocabulaires associés à ces grands courants. La première approche est celle inspirée par les travaux de Ferdinand de Saussure qui décrivent le lien existant en linguistique entre le mot (appelé signifiant) et l'objet ou le concept qu'il désigne (appelé signifié). La deuxième approche est inspirée des travaux de Charles Sanders Peirce qui introduit un troisième élément pour former le triangle sémiotique : l'interprétant, le sens, c'est-à-dire la représentation mentale que l'on se fait d'un objet à partir du signe physique correspondant.

Cette dernière approche s'est révélée particulièrement adaptée à la cartographie car elle distingue clairement l'objet physique, le symbole cartographique utilisé pour le représenter et la représentation que s'en fait l'utilisateur à la lecture de la carte [MacEachren, 1995]. Cela permet de décorrélérer l'étude des processus de conception (association d'un symbole graphique à un type d'objet), de perception (création d'une représentation mentale à partir d'un symbole graphique) et de cognition (interprétation du sens à donner à une représentation mentale) entrant en jeu dans la lecture d'une carte. Ainsi, il devient possible de prendre en compte la façon dont un symbole est perçu, compris et interprété par l'utilisateur, afin d'évaluer l'adéquation du symbole graphique choisi [Fabrikant, 2011]. La figure 2.2 présente une version modifiée pour la conception de représentations cartographiques mixtes, des triangles sémiotiques proposés par Peirce [1978], et adaptés à l'étude des images par Knowlton [1966], puis à la cartographie par MacEachren [1995, p256] et enfin par Fabrikant [2011] avec une attention particulière sur les mécanismes perceptifs et cognitifs. Le triangle sémiotique a été ici étendu pour considérer une représentation dans son ensemble. Si l'on analyse les liens entre les trois éléments du triangle dans le cas d'une représentation mixte (utilisant potentiellement un fond orthophotographique), des questionnements spécifiques émergent :

- Comment composer une représentation cartographique à partir de plusieurs signes graphiques covisualisés au sein de cette représentation ?
- Comment associer ces signes graphiques à des objets du monde réel pour en assurer une bonne compréhension ? Notamment, comment assurer la compréhension et la lisibilité de

signes graphiques hétérogènes présentées simultanément ?

- Peut-on utiliser les moyens graphiques à notre disposition pour influencer sur la perception de l'utilisateur et sa compréhension du territoire via la représentation qu'il consulte ou manipule ? En particulier, comment peut-on contrôler le degré de réalisme ou d'abstraction de la représentation pour la rendre plus efficace ?

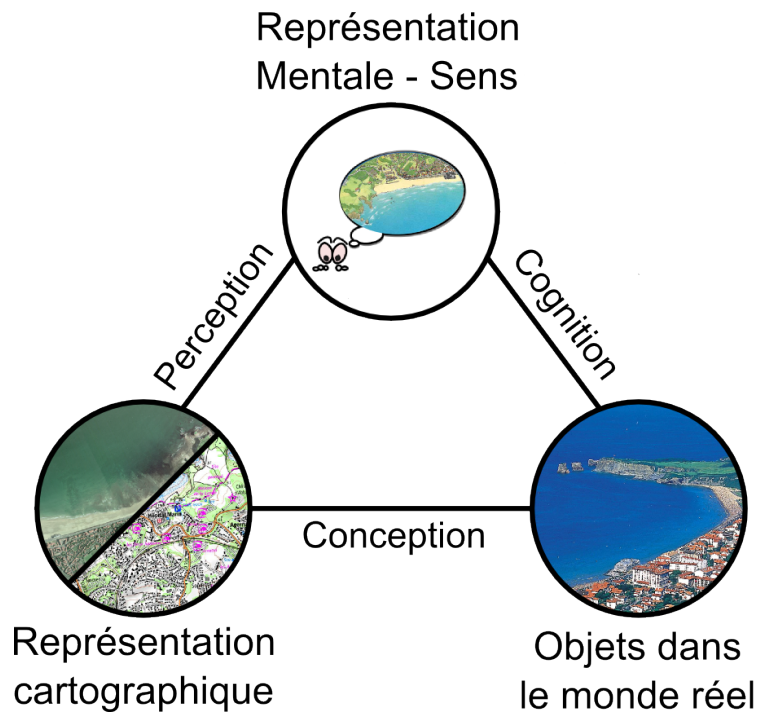


FIGURE 2.2 : Triangle sémiotique adapté à la cartographie, revisité par Fabrikant [2011], d'après Peirce [1978] et MacEachren [1995]

2.1.2 Méthodes de symbolisations spécifiques à l'utilisation de fonds orthophotographiques

Dans ce paragraphe, nous présentons les travaux de recherche en cartographie visant spécifiquement à la conception cartographique de représentations mixtes. Ces travaux se déclinent en trois volets : le premier visant à mettre en valeur un type de données au sein d'une représentation conçue avec des données hétérogènes, le second visant à adapter la symbolisation de données vectorielles par rapport au fond sur lequel elles sont superposées, et le troisième visant à évaluer et améliorer les représentations cartographiques mixtes. Tous ces travaux ont vocation à aider à la conception de représentations cartographiques de qualité.

Mise en valeur de l'information par accentuation de la saillance visuelle Une première façon de prendre en compte l'hétérogénéité d'un fond orthophotographique est d'accorder plus d'importance visuelle aux objets complémentaires qui lui sont superposés. Dans cette perspective, différentes approches proposent des méthodes d'accentuation de la saillance visuelle obtenue par l'utilisation d'une méthode de représentation particulière pour l'objet à mettre en valeur.

En vue d'aider le lecteur à se repérer dans l'espace et à associer les éléments de la carte à ceux de son environnement proche, plusieurs travaux s'attachent à mettre en valeur des points de repère. Selon la méthode de [Glander et al. \[2007\]](#), la taille des points d'intérêt est exagérée afin d'assurer leur visibilité lors d'une navigation avec une vue au niveau du piéton. [Grabler et al. \[2008\]](#) proposent une méthode combinant une extraction automatique de points de repère pertinents et un rendu dont le niveau de détail, l'expressivité et l'orientation des façades sont adaptés à l'importance des objets. [Trapp et al. \[2011a\]](#) dressent un inventaire des différentes méthodes de rendu pour surligner la symbolisation des points d'intérêt. Enfin, [Trapp et al. \[2011b\]](#) s'attachent à caractériser les propriétés de forme spécifiques à chaque point de repère en vue de les utiliser comme indice graphique de repérage dans l'espace grâce à des méthodes de symbolisation adaptées.

Adaptations graphiques de la symbolisation vectorielle au fond orthophotographique

Suite à l'apparition des images aériennes et satellitaires, l'apparition des photo-cartes et spatio-cartes a bouleversé la conception cartographique.

[Donnay \[2000\]](#) exhorte les cartographes à appliquer les principes de la sémiologie graphique lorsqu'ils utilisent un fond orthophotographique et recommande l'ajout de données vectorielles (qu'il appelle *données exogènes*) pour répondre à un besoin de lisibilité. Cependant, il met en garde les cartographes quant à la nature différente des informations du fond et des données superposées impliquant une grande diversité d'impacts visuels. Selon lui, cela rendra complexe tout ajout de données en termes de sémiologie graphique, et nécessaire l'adaptation de la symbolisation aux caractéristiques du fond.

Dans le même objectif de prise en compte des spécificités du fond orthophotographique, [Albertz et Lehmann \[2005\]](#) s'intéressent à la symbolisation des toponymes sur un fond orthophotographique et proposent un exemple concret de méthode de symbolisation adaptative : ils comparent plusieurs symbolisations et préconisent une symbolisation noire et l'ajout d'un halo blanc flou lorsque le fond est foncé. Selon cette méthode, la symbolisation ne sera pas la même localement selon la couleur du fond. C'est l'unique proposition d'adaptation à un fond non prédéfini que nous connaissons dans la littérature.

Enfin, [Raposo et Brewer \[2013\]](#) proposent une méthode de symbolisation pouvant survivre à un basculement entre un fond cartographique (formé d'un aplat blanc et d'un ombrage cartographique) et un fond orthophotographique. Leur objectif n'est pas de construire une méthode de symbolisation adaptative (qui serait différente selon le fond), mais une méthode qui soit adaptée aux deux fonds qui les intéressent. Pour cela, les auteurs proposent des symbolisations sophistiquées pour assurer la lisibilité des routes, des toponymes, des rivières, ou des chemins, en multipliant les contours colorés et en combinant des pointillés de couleurs plus ou moins foncées. Un point intéressant de leur approche est qu'elle s'attache à ce que le résultat soit perceptible sans se contraindre à ce qu'il soit visible. En effet, le jeu des pointillés de couleurs différentes pour représenter les rivières assure leur lisibilité grâce aux contrastes colorés engendrés mais ne se voit pas à la lecture de la carte.

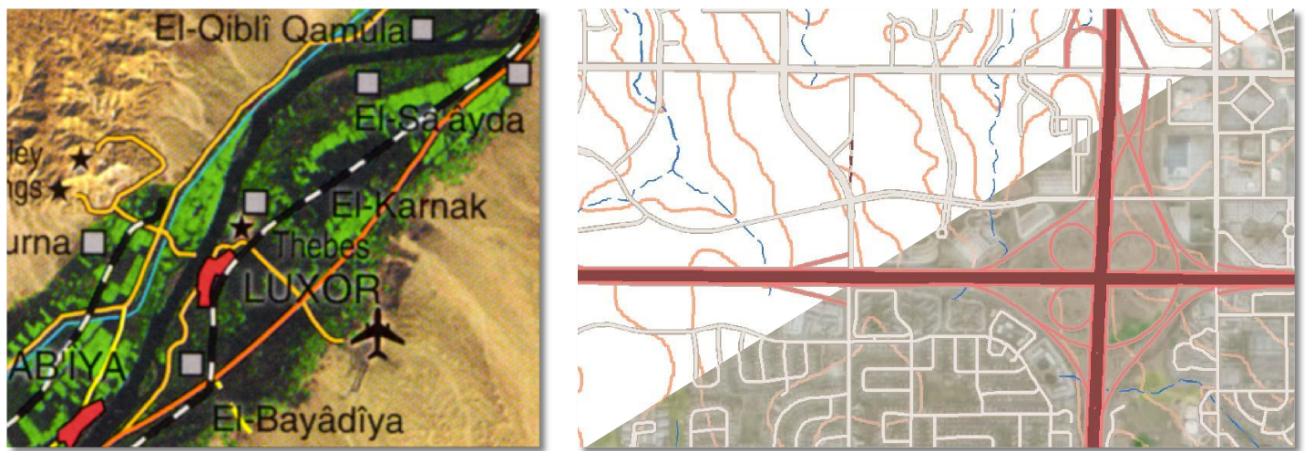


FIGURE 2.3 : Méthode de symbolisation adaptative par [Albertz et Lehmann \[2005\]](#) et de symbolisation survivante par [Raposo et Brewer \[2013\]](#).

Évaluation, amélioration et aide à la conception de représentations cartographiques mixtes Enfin, une autre façon de guider l'utilisateur dans la conception de représentations cartographiques mixtes, est de lui proposer des méthodes d'évaluation et d'amélioration automatiques de la représentation. Une attention particulière est parfois apportée à des aspects spécifiques de la qualité cartographique. [Chesneau \[2006\]](#) s'intéresse aux contrastes colorés entre objets cartographiques au regard des relations sémantiques qui les relient. [Bessadok et Dominiguès \[2011\]](#) proposent des indicateurs qualifiant la visibilité des objets cartographiques dans le contexte d'une covisualisation au sein d'une application de géovisualisation de type géoportail. D'autres travaux entendent évaluer et/ou améliorer la carte dans sa globalité. Dans le même contexte [Harrie et al. \[2011\]](#) identifient des difficultés de conception liées à la visualisation de données sous la forme de services web au sein d'un géoportail. Enfin, [Tooamnian et al. \[2014\]](#) mettent en place une infrastructure d'amélioration du rendu de la carte en injectant des connaissances cartographiques directement dans le moteur de rendu.

Nous avons présenté ici des travaux visant à concevoir des représentations intégrant des données hétérogènes. Cependant, ces travaux n'ont pas spécifiquement vocation à prendre en compte l'utilisation d'un fond orthophotographique. De plus, pour répondre à notre objectif de conception d'un continuum cartographique, il nous faudra disposer de méthodes de symbolisation automatique, ce qui n'est pas le cas d'une majorité des travaux présentés dans ce paragraphe. Enfin, l'utilisation de fond orthophotographique nous ouvre la porte vers la conception de représentations cartographiques dont il est nécessaire de contrôler le degré de réalisme et d'abstraction.

2.2 Contrôler le degré de réalisme et d'abstraction

La diversité des styles cartographiques (Cf. figure 2.4) en fait un véritable sujet d'étude [[Field et Demaj, 2012](#)]. [Beconyte \[2011\]](#) identifie trois paramètres de description d'un style cartographique (la décorativité, l'expressivité et l'originalité) et quatre catégories de styles cartographiques plus ou moins sophistiqués. Ce cadre théorique lui permet ensuite de décrire différents styles cartographiques emblématiques. [Ory et al. \[2013\]](#) s'intéressent plus précisément au style topographique,

à sa description et à la compréhension de l'influence qu'ont le processus et les pratiques cartographiques sur le style d'une part, et à l'identification des caractéristiques visuelles et des mécanismes cognitifs permettant la reconnaissance d'un style d'autre part.



FIGURE 2.4 : Diversité des styles cartographiques identifiés par Field et Demaj [2012] comme représentatifs de l'excellence cartographique.

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons à une caractéristique particulière du style topographique apportée par l'utilisation conjointe de données vecteurs et d'orthophotographies : son degré de réalisme et d'abstraction. En effet, la relation de la carte à la réalité a initié de nombreux travaux visant soit à réduire la complexité du territoire représenté par l'utilisation d'outils d'abstraction, soit à accentuer le réalisme des symbolisations utilisées pour minimiser l'écart de perception entre la carte et la réalité. Enfin, ces deux tendances ayant chacune leurs avantages et leurs inconvénients, plusieurs travaux de recherche en cartographie visent à permettre au cartographe de contrôler le degré de réalisme et d'abstraction d'une représentation cartographique en fournissant des outils de créations de continuum de styles cartographiques allant du réalisme à l'abstraction.

C'est pourquoi, dans ce paragraphe, nous décrivons les aspects graphiques de l'abstraction (Cf. §2.2.1) et du réalisme (Cf. §2.2.2) qui influencent la conception de représentations, notamment cartographiques. Puis nous dessinons une tendance nouvelle visant à augmenter le réalisme des représentations cartographiques (Cf. §2.2.3). L'abstraction est traditionnellement un aspect fondamental de la cartographie. Le fait de pouvoir rendre réaliste une représentation cartographique ouvre donc la porte à la constitution de continuum de styles cartographiques plus ou moins réalistes ou abstraits (Cf. §2.2.4). Enfin, toutes ces façons de contrôler le degré de réalisme et d'abstraction soulèvent la question de son influence sur la perception de l'utilisateur (Cf. §2.2.5).

2.2.1 L'abstraction comme outil de simplification de l'information

All maps are abstractions of reality.

A. H. ROBINSON *et al.*, *Elements of cartography*.

L'abstraction a été définie dans divers domaines scientifiques, artistiques, philosophiques, etc., souvent par opposition notamment au figuratif ou au réalisme en peinture. La définition du Petit Robert indique que l'abstraction est le :

"Fait de considérer à part un élément (qualité ou relation) d'une représentation ou d'une notion, en portant spécialement l'attention sur lui et en négligeant les autres."
[Robert *et al.*, 2008]

Cette définition suggère une conceptualisation inhérente à l'abstraction qui consiste à décomposer les propriétés caractéristiques des objets du monde réel, afin de créer des connaissances par raisonnement logique en mathématiques, ou d'en extraire des caractéristiques communes en philosophie ou encore de se libérer de la représentation des objets en eux-mêmes en art. C'est le cas de l'art abstrait qui ne fait plus directement référence aux objets mais s'intéresse à la forme et à la couleur comme élément expressif en soi comme l'illustrent les toiles de la figure 2.5.

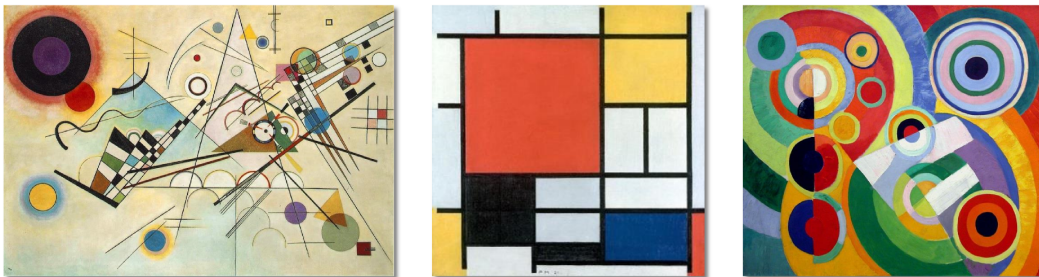


FIGURE 2.5 : Art abstrait : Wassily Kandinsky, Piet Mondrian et Sonia Delaunay

Nous adoptons une approche liée à la représentation (carto-)graphique dans l'esprit de Mustière *et al.* [2000] et définissons l'**abstraction** comme une simplification de la perception du monde réel. De plus, nous distinguons deux types d'abstraction d'après McCloud [1994] : la simplification des propriétés visuelles (la forme, la couleur, etc.) et la simplification du sens par élimination de détails significatifs.

En cartographie, plusieurs étapes du processus de conception cartographique ont pour objectif de simplifier l'information représentée, elles peuvent être considérées comme des étapes d'abstraction de la représentation.

Tout d'abord, en tant que représentation plane du monde réel, les représentations cartographiques (que ce soit des cartes, des orthophotographies ou toute autre forme de représentation cartographique) sont des reproductions réduites de la surface de la Terre [Donnay, 2000], sous la forme d'une image en deux dimensions. En cela, elles établissent un lien abstrait entre la réalité et le lecteur de la représentation en faisant référence graphiquement aux éléments réels. De plus, elles fournissent une image réduite de cette réalité selon un facteur d'échelle, impliquant

une simplification nécessaire de la réalité lorsqu'elle est représentée sur une surface restreinte et des mécanismes cognitifs complexes de remise à l'échelle mentale. Enfin, une représentation cartographique (qu'elle soit au format papier ou affichée sur un écran) constitue une altération géométrique de la réalité en cela qu'elle est présentée à l'utilisateur en deux dimensions tandis qu'elle représente une réalité en trois dimensions. Cette déformation géométrique est obtenue par l'utilisation d'une projection cartographique modélisant le passage d'une sphère à un plan. La figure 2.6 présentent divers exemples de projections cartographiques illustrant des vues du globe plus ou moins abstraites car plus ou moins déformées géométriquement.

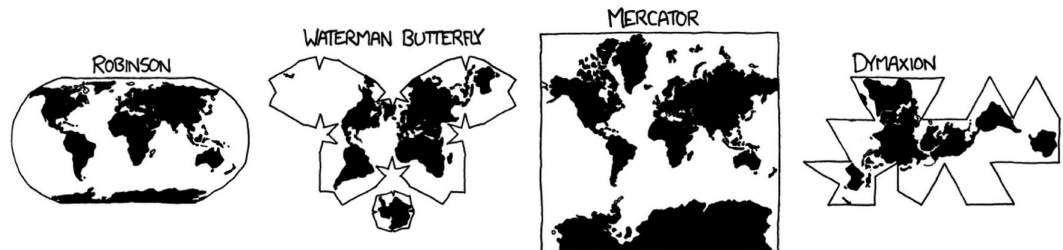


FIGURE 2.6 : Projections cartographiques².

Certaines étapes du processus cartographique constituent des **abstractions sémantiques** ou conceptuelles. Tout d'abord, la constitution d'une base de données implique la sélection, la classification et l'interprétation des objets selon leur nature. Donnay [2000] avertit que cette toute première phase de spécification d'une carte ou d'une base de données n'est ni neutre ni impartiale et peut différer significativement selon l'intention initiale du cartographe ou du producteur de données. Pour cette raison, il affirme que les cartes et bases de données géographiques sont pour cela des abstractions car elles altèrent et simplifient la perception initiale du monde réel. De même, les orthophotos sont également des abstractions de la réalité à son avis car elles sont le résultat d'une acquisition sélective par un capteur spectral. Cependant, cette étape de spécification est indispensable à l'organisation de la base de données selon un schéma de données constitué de classes d'objets de même nature auxquels sont associés des attributs. Cette conceptualisation est réalisée conformément au partage de propriétés communes, ce qui constitue une application directe de la définition générale ci-dessus. De plus, la structuration de la légende implique un nouveau regroupement d'objets pour former des thèmes cartographiques, nouvelle abstraction sémantique visant à réduire la complexité de la représentation. Selon les différents modèles de légende cartographique, cette structure peut être plus ou moins hiérarchique ; cela constitue une abstraction supplémentaire de l'information présente dans la carte car des liens sémantiques forts sont ainsi créés explicitement entre les données et entre les symbolisations. Robinson [1978] identifie d'ailleurs cette qualité de structure comme étant l'un des attributs qui rend la carte unique parmi les documents scientifiques. Enfin, l'encodage de l'information par le biais de la légende graphique établit un lien abstrait entre les éléments graphiques et le sens qui leur est associé. D'après Bertin [1967], c'est cette abstraction sémantique qui assure la monosémie de l'interprétation faite par l'utilisateur ; il l'oppose d'ailleurs à la polysémie engendrée par la lecture d'une orthophotographie, qui semble donc moins abstraite que la carte de ce point de vue car elle ne présente pas une information interprétée ou extraite, classifiée, puis encodée.

Le processus cartographique introduit également des **abstractions géométriques**. Les trai-

²Illustrations humoristiques de la psychologie des projections cartographiques, Cf. <http://xkcd.com/977/>.

tements de généralisation ont directement pour objectif la simplification des données en vue de leur adaptation à un affichage à une échelle donnée et manipulent pour la plupart la géométrie des objets. En effet, les opérateurs de généralisation cartographique, dont on peut trouver une classification dans Mustière [2001], ont pour effet de déplacer ou de déformer les objets. Ces altérations de la position et de la description géométrique de la forme des objets sont réalisées pour accentuer une caractéristique géométrique saillante (par amplification, écarissage, lissage, etc) ou préserver une structure topologique de plus haut niveau (comme un alignement de bâtiments ou bien la proximité, l'adjacence de deux objets). Cette partie de la généralisation cartographique a clairement pour objectif de conserver des propriétés plus abstraites au détriment de la géométrie initiale, dans l'esprit de la théorie de la Gestalt. La figure 2.7 présente un résultat de généralisation d'une carte au 1/50000 qui contient des géométries plus simples, accentuées, etc. et établit un lien plus lisible mais plus abstrait avec la réalité.

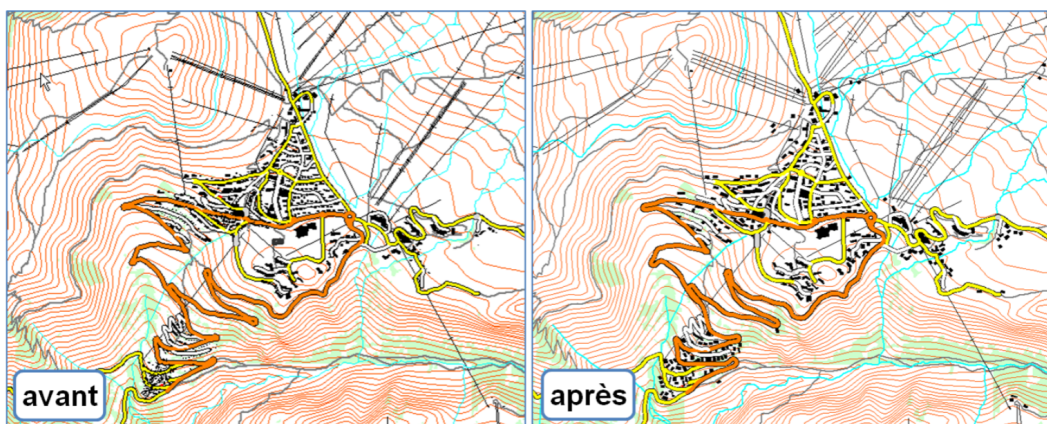


FIGURE 2.7 : Résultat de généralisation au 1/50 000^{ième} par le modèle CollaGen par Touya [2011].

Certains types de cartes vont encore plus loin dans l'abstraction géométrique en négligeant encore plus la géométrie ou la position exacte des objets. Trois types de cartes sont caractéristiques de cette abstraction géométrique à l'extrême (Cf. figure 2.2.1) :

- Les cartes en anamorphose présentent des géométries déformées afin de représenter des objets de surface proportionnelle à une donnée quantitative comme la population, la distance d'accès en transport, etc. Cette technique est identifiée par Cauvin [1997] comme un type de transformation cartographique de position.
- Les cartes de type plan de métro présentent également des géométries déformées en vue de mettre en avant la topologie des lignes et des interconnexions. De plus, la forme des lignes est schématisée, simplifiée par une ligne droite ou en angle droit afin de faciliter la perception de la continuité des lignes. Jenny [2006] étudie les déformations géométriques induite par cette technique de cartographie.
- La carte-modèle et les chorèmes sont un instrument d'analyse pour la géographie visant à représenter les structures et dynamiques spatiales. Brunet [1980, 1986] décrit un ensemble de règles de construction de ce type de cartes, associées à des modes de représentations des structures élémentaires de l'espace et une procédure de conception.

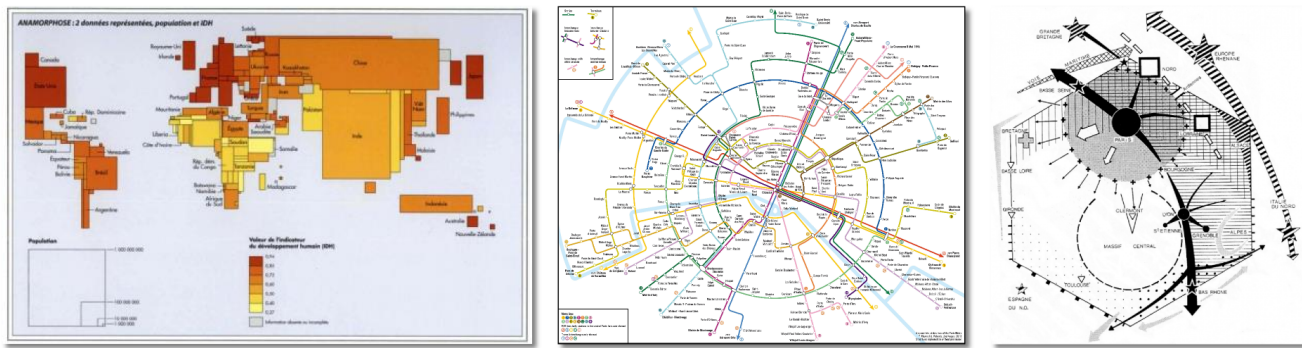


FIGURE 2.8 : Exemples d'abstractions géométriques extrêmes : anamorphose⁵, plan du métro de la ville de Paris⁶ et chorème par Brunet [1973].

Les méthodes de symbolisation cartographique constituent des **abstractions graphiques** de l'information. En effet, ces méthodes impliquent généralement l'utilisation de couleurs vives et arbitraires afin de respecter les principes de la sémiologie graphique. De plus, en s'intéressant au lien existant entre l'objet représenté et le signe par le biais de l'interprétation de l'utilisateur, MacEachren [1995, p.256-269] répertorie de nombreux travaux qui ont analysé l'abstraction graphique des symboles ponctuels utilisés en cartographie : pour Keates [1982] un symbole peut être plus ou moins figuratif ou conventionnel ; Robinson *et al.* [1995] définissent trois catégories de symboles géométrique, associatif, ou figuratif ; pour Robinson et Petchenick [1976] un symbole peut être plus moins mimétique ou arbitraire ; pour Knowlton [1966] un symbole peut être plus ou moins arbitrairement choisi ou réalisé ; enfin, pour Ucar [1993] un symbole peut être plus moins abstrait ou figuratif. L'ensemble de ces travaux s'attache à décrire l'abstraction graphique de la forme, de la couleur, et de la stylisation d'un symbole cartographique. Dans le même esprit, dans le domaine artistique du dessin de bandes dessinées, McCloud [1994] décrit deux formes d'abstraction d'une représentation, l'une s'attachant aux propriétés visuelles, l'autre au sens de l'objet représenté.

Ces abstractions sémantiques, géométriques et graphiques sont notamment utilisées et combinées par les approches de stylisation artistique d'une carte. Le processus d'aquarellisation proposé par l'agence de design Stamen implique par exemple une forte sélection des données, de nombreuses simplifications géométriques des données et un rendu artistique. Les travaux de Van Goethem *et al.* [2014] visant à créer des cartes sténographiques mettent également en œuvre des traitements géométriques visant à simplifier la géométrie à l'extrême. La méthode de conception de cartes à la façon d'un croquis proposée par Wood *et al.* [2012] suppose une simplification caricaturale des géométries des objets et une stylisation artistique plutôt abstraite. De même, Isenberg [2013] propose une méthode d'abstraction visuelle impliquant une forte abstraction géométrique en vue de créer des cartes d'illustration.

Il existe également des travaux de recherche visant à simplifier graphiquement une image pour répondre notamment aux exigences du style artistique visé, en informatique et en traitement d'images. Parmi ceux-ci, différentes approches sont adoptées pour réduire l'information : la

⁵La définition d'une anamorphose illustrée par cette carte est disponible à l'adresse suivante : <http://books.openedition.org/irdeditions/7763>.

⁶Les plans de métro réalisés par Max Roberts sont consultables à l'adresse suivante : <http://privatewww.essex.ac.uk/~mjr/underground/tubemap.html>.

segmentation de l'image en zones homogènes (selon un critère donné : la couleur, la texture, ...), la réduction du nombre de couleurs ("color quantization" en anglais), le lissage par utilisation de filtres de traitement d'image (filtre gaussien, etc). Ces approches sont ensuite combinées entre-elles et avec des méthodes de stylisation pour obtenir des méthodes de rendu expressifs. Par exemple, différents travaux proposent des méthodes de stylisation d'une photographie selon un style de bande dessinée en simplifiant l'image par segmentation et réduction du nombre de couleurs. DeCarlo et Santella [2002] suggèrent d'adapter la simplification selon la saillance des objets de l'image initiale déterminée par l'utilisation d'un eyetracker. Il s'agit donc de rendre l'image plus abstraite en la simplifiant et en préservant les structures importantes de l'image de départ ; l'approche générale est très similaire à celle de la généralisation cartographique décrite au paragraphe précédent. Sauvaget et Boyer [2008] présentent une approche similaire prenant en compte la profondeur des objets dans la scène représentée. Enfin, Kyprianidis et Döllner [2008] considèrent l'orientation des contours dans l'image afin d'éviter les artefacts visuels et créer une image plus lisse et régulière. Semmo *et al.* [2010] appliquent cette méthode à l'abstraction automatique d'images. La figure 2.9 présente un exemple de ces travaux illustrant le potentiel de ce type de méthode pour réduire la complexité d'une orthophotographie.



FIGURE 2.9 : Abstraction automatisée d'une image, par Semmo *et al.* [2010].

Ces étapes de simplification de l'image peuvent également être combinées avec des méthodes de sémantisation de l'image, entendant ajouter du sens à l'image en identifiant des zones ou des objets importants dans l'image. Cette information ajoutée est plus abstraite que celle contenue dans l'image initiale : en effet, elle est généralement associée à une description de la nature des objets identifiés. La sémantisation d'images est également très utilisée dans le domaine de l'information géographique. Un des enjeux de la télédétection est par exemple l'extraction de la nature de l'occupation du sol, par classification des pixels selon des critères radiométriques et spatiaux.

Enfin, **les recherches en rendu expressif** visent à créer des images stylisées, esthétiques ou artistiques sans se contraindre à rechercher le réalisme de l'image créée. Pour cela, les chercheurs en rendu expressif proposent des méthodes de rendu artistique automatisées permettant à des graphistes, artistes, dessinateurs, peintres, etc. de créer des images expressives. Il est important de noter que les méthodes de rendu artistique sont souvent utilisées conjointement à des méthodes

d'analyse d'image permettant d'extraire des caractéristiques graphiques (comme la composition colorée ou la structure de l'image) (Cf. § 2.2.1). Parmi les méthodes dédiées au rendu, classifiées par Ostromoukhov [2002], Sayeed et Howard [2006], Kyprianidis *et al.* [2013] et détaillées dans Rosin et Collomosse [2013], nous décrivons ici celles qui peuvent être utilisables en cartographie, c'est-à-dire celles qui sont potentiellement applicables aux données géographiques.

De plus, des méthodes de rendu expressif se donnent pour objectif de styliser des images ou des régions de l'image à synthétiser. Pour cela, une des approches adoptées consiste à proposer des filtres de prétraitement de l'image (filtres de couleurs, floutage de l'image, sous et sur échantillonnage, détection des contours, etc.), puis de les combiner pour créer l'image finale. Le travail de Bousseau *et al.* [2006] visant à reproduire un style d'image aquarellisée, illustrée à la figure 2.10 est un exemple de composition de méthodes de traitement d'image visant à reproduire un style artistique, l'aquarelle, et un médium, le pinceau sur du papier à dessin.



FIGURE 2.10 : Aquarellisation par traitement d'images par Bousseau *et al.* [2006].

2.2.2 Le réalisme comme levier de communication de l'information

Tout comme l'abstraction, le réalisme a été défini dans plusieurs domaines artistiques, notamment la littérature et la peinture, dans leurs courants les plus descriptifs. La définition du Petit Robert indique que le réalisme est une :

"Conception de l'art, de la littérature, selon laquelle l'artiste ne doit pas idéaliser le réel ou en donner une image épurée." [Robert *et al.*, 2008]

Selon cette dernière partie de la définition, il est possible d'opposer le réalisme à l'abstraction en cela qu'il n'admet pas de simplification de la réalité en tant que

"Recherche d'une ressemblance exacte avec le modèle." [Robert *et al.*, 2008]

Nous définissons **le réalisme** comme la fidélité à la perception directe du monde réel par l'utilisateur.

Ainsi, le réalisme aura un effet inverse à celui de l'abstraction vis-à-vis de l'utilisateur. En augmentant les similitudes entre la représentation et la réalité correspondante, l'artiste, le graphiste ou le cartographe entend faciliter l'association entre les éléments présents dans la représentation et leur(s) homologue(s) du monde réel mais ne cherche pas à simplifier l'information.

Les différents aspects du réalisme liés à la cartographie et la géovisualisation sont le *niveau de détail* de l'information représentée, le réalisme de la symbolisation adoptée (en termes de matière, de texture et d'illumination notamment), la mise en valeur du relief, le nombre de dimensions, l'immersion et l'interactivité de la représentation [MacEachren *et al.*, 1999; Boér *et al.*, 2013].

Afin de mesurer le degré de réalisme, plusieurs travaux ont proposé des échelles de stylisation, en opposant généralement le réalisme à l'abstraction. Abraham Moles définit par exemple un degré d'iconicité comme étant un degré de similarité entre le signe graphique et ce qu'il représente, allant de la ressemblance très élevée au codage abstrait de l'information [Vanmalderen, 1982; Moles, 1978]. De même, en cartographie, les descriptions de l'abstraction d'un symbole cartographique l'opposent généralement à une des facettes du réalisme (le mimétisme, la ressemblance figurative, etc.).

La notion de **niveau de détail** est formalisée pour un modèle 3D de ville par Biljecki *et al.* [2014] qui identifient six paramètres mesurables permettant de définir le niveau de détail d'un modèle donné.

Faire réaliste en ajoutant une image photographique L'apparition d'images satellites et aériennes géoréférencées a permis leur utilisation progressive au sein d'applications cartographiques [Le Corre et Jégou, 2005] et leur intégration au processus de cartographie [Donnay, 2000] afin de rendre une représentation plus réaliste. En effet, Bianchin [2007] liste les caractéristiques de réalisme d'une photographie. Les orthophotographies apparaissent comme une vérité terrain, c'est-à-dire une représentation très peu modifiée du monde réel. Elles jouissent de l'objectivité intrinsèque de leur processus d'acquisition et de l'absence d'intervention humaine qui augmentent leur pouvoir de crédibilité selon Bazin [1945]. De plus, Bianchin insiste sur le statut non-codifié et continu du message cartographique en s'appuyant sur ces mots de Barthes [1961] :

" [...] certes l'image n'est pas le réel ; mais elle en est du moins son analogon parfait, et c'est précisément cette perfection analogique qui devant le sens commun, définit la photographie : ainsi paraît le statut particulier de l'image photographique : c'est un message sans code ; proposition dont il faut tout de suite dégager un corollaire important : le message photographique est un message continu. "

L'image photographique en général et les orthophotographies en particulier ne présentent donc pas d'abstraction sémantique issue de l'interprétation des objets les composant ni de leur nature. Utiliser des orthophotographies comme matériaux de base pour la conception cartographique peut permettre d'apporter du réalisme à la représentation. Ainsi, différents travaux utilisent des orthophotographies comme source d'information réaliste pour l'extraction de caractéristiques réalistes (couleurs ou textures naturelles, etc.) à réinjecter dans la conception de représentations réalistes. Crombez *et al.* [2013] présentent une méthode de colorisation photoréaliste de nuage de points après recalage avec des données photogrammétriques de haute résolution à partir desquelles seront extraites les couleurs naturelles pour la recolorisation. Lafarge *et al.* [2010] proposent une méthode visant à extraire des textures naturelles dans un ensemble de photographies. Enfin, dans l'esprit des méthodes de rendu photoréaliste, Dachsbacher *et al.* [2006] utilisent des données géographiques pour recréer une réalité artificielle par le biais d'une orthophotographie synthétique.

Solutions de rendu graphique pour faire réaliste Les recherches en rendu réaliste visent à créer une image qui soit la plus fidèle possible à la scène représentée. Ferwerda [2003] décrit trois aspects complémentaires du réalisme qui ont guidé les différentes approches de ces travaux de recherche :

- La recherche du réalisme physique conduit les chercheurs à modéliser le plus finement possible la forme des objets, les matériaux et l'illumination de la scène représentée afin de modéliser un stimulus visuel le plus fidèle possible.
- La création de rendu photoréaliste consiste à recréer une image qui soit la plus proche possible d'une photo prise de la scène représentée selon un point de vue donné.
- Le réalisme fonctionnel implique que l'image créée fournisse les mêmes informations visuelles que celles présentes dans la scène représentée.

Ces recherches supposent de décrire les phénomènes physiques et les mécanismes perceptifs mis en jeu dans la vision d'une scène du monde réel par un être humain, puis de simuler cette réalité pour recréer une perception similaire. Pour cela, des méthodes de rendu sophistiquées ont été proposées et sont actuellement disponibles dans les logiciels de synthèse d'image utilisés par exemple pour créer des films en image de synthèse, des films d'animation réalistes ou des jeux vidéos. La modélisation fine de la trajectoire et de la réflexion ou de l'absorption des rayons lumineux par les différents matériaux permet de simuler différentes matières (lisse, transparente, translucide, brillante, etc.) pour un même objet comme l'illustre la figure 2.11. De plus, la maîtrise de ces paramètres d'illumination permet de réaliser des effets d'éclairage et d'ombre et de gérer les occlusions.

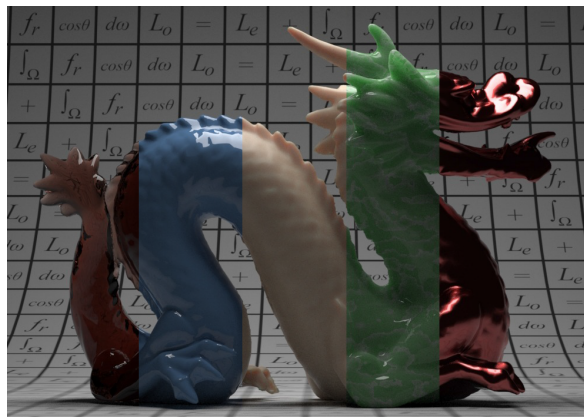


FIGURE 2.11 : Différents effets de matière réalisés avec la bibliothèque ArnoRd [Langlands, 2014].

Dans la même optique de synthèse d'images réalistes, des méthodes de génération de texture procédurales utilisant des fonctions de bruit sont proposées, comme celle proposée par Perlin [1985] et illustrée par la figure 2.12. Lagae et al. [2010] dressent un inventaire de ces méthodes et décrivent leurs avantages : elles permettent de créer une apparence pseudo-aléatoire et sont continues dans l'espace image, reproductibles, contrôlables et paramétrables par le concepteur de l'image, rapides à générer, et nécessitent peu d'espace mémoire. Les applications de ce type de textures sont nombreuses et consistent souvent à reproduire un matériau naturel comme le marbre (Cf. figure 2.12), le bois, des vagues ou encore des nuages.

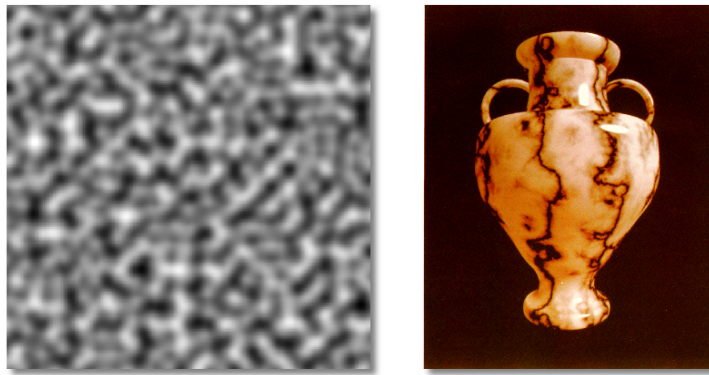


FIGURE 2.12 : Texture procédurale à base de bruit de Perlin : échantillon et application à la synthèse d'une image d'un vase en marbre par [Perlin \[1985\]](#)

2.2.3 Des représentations cartographiques de plus en plus réalistes

De nombreux travaux en conception cartographique visent à augmenter le réalisme de la représentation. En plus de l'utilisation croissante de fond orthophotographique évoquée au chapitre précédent, différentes approches visent à augmenter le réalisme des représentations cartographiques. La plupart de ces travaux utilisent des méthodes issues de l'informatique graphique en les adaptant au contexte de la conception cartographique.

2.2.3.1 Modes de représentations 3D

L'apparition de données, de modes de représentations et d'interfaces de visualisation en **trois dimensions (3D)** est un des facteurs d'augmentation du réalisme dans les représentations cartographiques. A titre d'exemple, la figure 2.13 présente un plan des pistes selon une vue panoramique 3D déformée destinée à faire comprendre l'organisation du domaine skiable. Les données 3D permettent également la création de réalités mixtes (Cf. §1.2.7) et leur diffusion par le biais d'interfaces immersives.

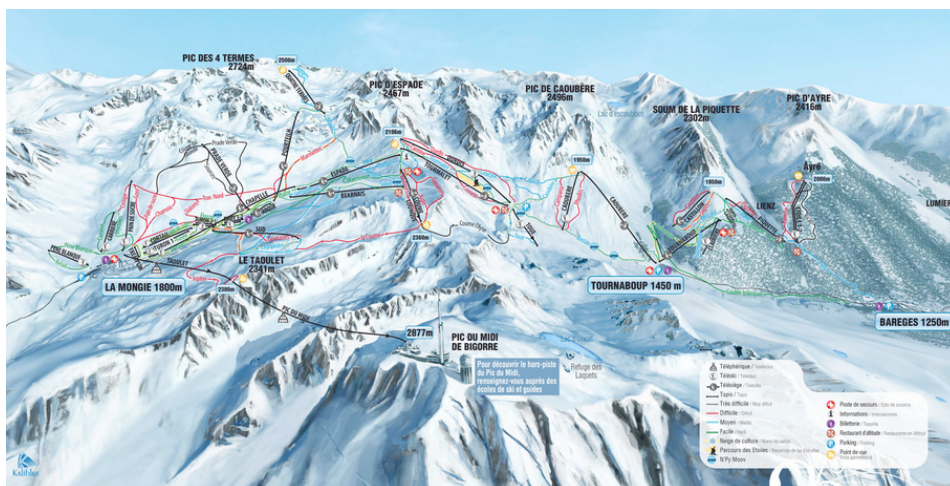


FIGURE 2.13 : Plan des pistes de la station de ski Barrège-La Mongie réalisé numériquement par la société Kaliblué⁸.

De plus, en géovisualisation des moteurs de rendu géographiques (comme Blender⁹ ou CityEngine¹⁰) sont spécifiquement dédiés à la visualisation de données en 3D. Ces moteurs permettent de représenter une scène en trois dimensions, selon un point de vue dans l'espace, l'emplacement métaphorique d'une caméra virtuelle qui filmerait la scène. Brasebin [2014, p. 26-28] décrit les éléments fondamentaux pour construire un rendu 3D que sont la caméra, les sources de lumières et les objets, et fait un parallèle entre leur utilisation en visualisation 3D et en représentation cartographique 2D. Cette analyse met en évidence les nouvelles possibilités graphiques offertes par la visualisation 3D : le cartographe peut alors maîtriser l'éclairage de la scène pour créer des effets de lumières, d'ombrages et de couleurs, ainsi que le système optique de la caméra virtuelle pour ajouter des effets de flous ou d'estompage selon la distance entre l'objet et la focale de la caméra. Ces nouveaux effets visuels sont réalisables grâce à l'utilisation récente des cartes graphiques dans le rendu de données géographiques 3D, ils n'apparaissent donc pas dans les travaux théoriques en cartographie. Dans ce contexte, Pelloie [2014] initie la mise en place d'une sémiologie graphique 3D. Il identifie deux critères graphiques pour qualifier un rendu 3D : le photoréalisme et le niveau de détail des données.

2.2.3.2 Utilisation d'effets visuels, d'effets de matières et de textures

Plusieurs travaux de recherches en cartographie visent spécifiquement à augmenter le réalisme de la représentation et proposent pour cela d'utiliser des effet visuels, de matière et de texture. Patterson [2002] préconise des règles pour concevoir une carte réaliste et suggère l'utilisation de différentes techniques graphiques pour refléter la réalité : la représentation naturelle de l'hydrographie (qu'il appelle *aquafication*), l'utilisation de textures réalistes, l'illumination du relief, et la mise en valeur de la zone d'intérêt (Cf. figure 2.14, à gauche). Jenny *et al.* [2012] s'intéressent à la création de cartes pseudo-naturelles et suggèrent l'utilisation de couleurs naturelles et de textures réalistes et progressives (Cf.figure 2.14, à droite). Ghadirian et Bishop [2008] proposent d'augmenter le réalisme de la représentation en incrustant des éléments adaptés selon les différentes saisons de l'année : dans leur application, les auteurs utilisent les principes de la réalité augmentée pour ajouter des touffes d'herbes plus ou moins imposantes à un paysage .

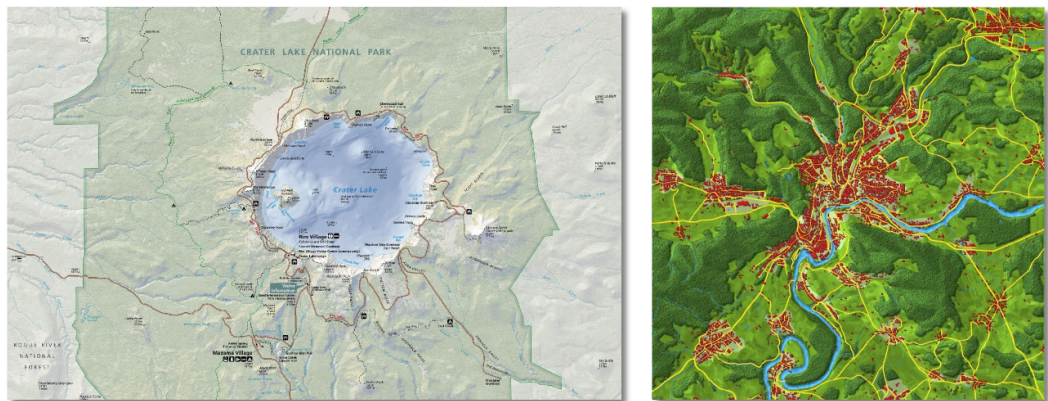


FIGURE 2.14 : Carte réaliste par Patterson¹¹ et carte pseudo-naturelle par Jenny¹².

⁸Les panoramas 2D et 3D de la société Kalibblue sont consultables à l'adresse suivante http://www.kalibblue.com/plans_hiver.php.

⁹Site web du logiciel Blender : <http://www.blender.org/>

¹⁰Site web du logiciel City Engine : <http://www.esri.com/software/cityengine>

En parallèle, tout un ensemble d'**effets visuels** sophistiqués (ombre portée, bosselage, flou, filtres colorés) est progressivement utilisé et parfois adapté pour la cartographie, afin de mettre en valeur ou d'estomper certains objets géographiques particuliers au sein de la représentation. Cron [2011] revisite par exemple les effets visuels de relief présents dans les logiciels de dessin vectoriel et les utilise comme de nouvelles variables visuelles pour donner du relief à la carte et mettre certains éléments cartographiques en valeur. La figure 2.15 présente un exemple d'illustration cartographique dans laquelle les rivières ont été mises en valeur par des effets d'ombrage donnant une impression de relief en creux tandis que les forêts et les bâtiments ont été mis en valeur par un effet d'ombrage donnant une impression de relief en élévation. D'autre part, les zones industrielles ou commerciales sont symbolisées par une emprise grise dont les bords sont estompés par des effets de flou.



FIGURE 2.15 : Exemple de mise en valeur esthétique de données géographiques par l'utilisation de logiciels de dessin assisté par ordinateur, par François Gueydon.¹⁴

Des **textures** sont de plus en plus utilisées pour donner une impression de matière (grain de toile de peinture, papier froissé, bois, etc.) ou pour rendre la représentation plus réaliste en représentant certains objets cartographiques le plus fidèlement possible par rapport à la perception qu'en aurait un utilisateur dans le monde réel (vaguelettes dans les surfaces d'eau, texture de feuilles ou d'arbres dans la forêt, etc.). Yu *et al.* [2011] proposent par exemple une méthode de génération de texture procédurale à partir d'une fonction de bruit adaptée à l'écoulement de l'eau le long d'une rivière en rendant sa texture influençable par une carte d'orientation. La figure 2.15 présente un exemple de forêt symbolisée par une texture d'arbres. De plus, un effet grain de papier a été appliqué à la représentation pour donner une impression de matière tangible. Cela permet de combiner selon différents modes des couches de données géographiques, ou de donner un effet de matière à la carte en utilisant un fond simulant un média comme dans la carte de la

¹¹D'autres exemples de cartes réalistes sont consultables à l'adresse suivante : <http://www.shadedrelief.com/realism/>.

¹²D'autres exemples de cartes pseudo-naturelles sont consultables à l'adresse suivante : <http://cartography.oregonstate.edu/pseudo-natural.html>.

¹⁴Les réalisations de François Gueydon sont consultables à l'adresse suivante : <http://www.cartographersguild.com/members/francissimo-albums-map+collection.html>.

figure 2.16 qui présente une carte texturée avec un fond en papier froissé.



FIGURE 2.16 : Exemple d'utilisation des modes de blending dans QGIS, par Nathan Woodrow¹⁶

Ces nouvelles possibilités semblent particulièrement intéressantes dans le contexte de la conception de représentation cartographique mixte. En effet, l'utilisation de masque apparaît comme un outil utile pour covisualiser des morceaux choisis et juxtaposés de représentations cartographiques différentes. De même, les outils de filtres colorés pourraient se révéler comme une alternative intéressante aux traditionnelles méthodes de symbolisation d'un raster (en couleur, en fausses couleurs ou en noir et blanc).

2.2.3.3 Expressivité de la symbolisation de certains thèmes cartographiques

Enfin, en vue d'augmenter l'expressivité de la symbolisation de certains thèmes cartographiques, des méthodes de symbolisation cartographique sophistiquées ont été proposées dans l'esprit des travaux en rendu expressif sur le dessin au trait. Les problématiques de recherche en rendu expressif abordées sont le dessin d'un trait en simulant un type de médium (crayon, pinceau, plume, etc.) et le placement des traits pour créer une texture. Par exemple, la figure 2.17 est constituée de vingt textures représentatives de cette branche du rendu expressif choisies pour comparaison par Bénard *et al.* [2009] et présentant différentes techniques de dessin et différents arrangements plus ou moins réguliers ou aléatoires. Pour aller plus loin dans le placement de motifs pour former une texture vectorielle, Loi *et al.* [2013] proposent une méthode programmable permettant de décrire des arrangements empilables hiérarchiquement à partir d'un ou plusieurs motifs (Cf. figure 2.18).

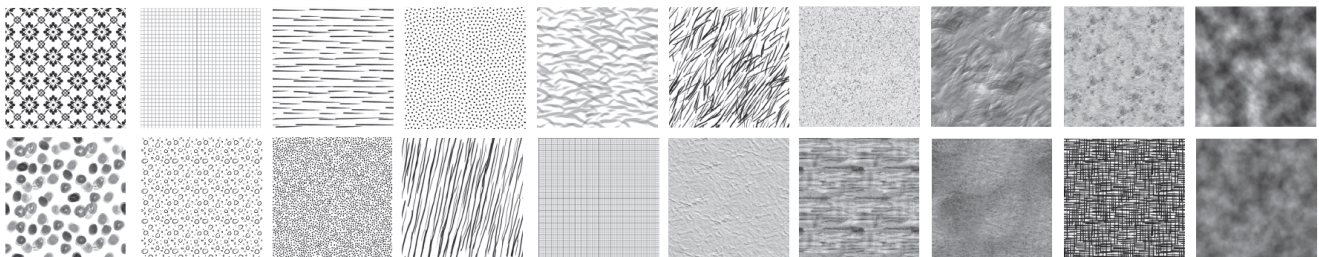
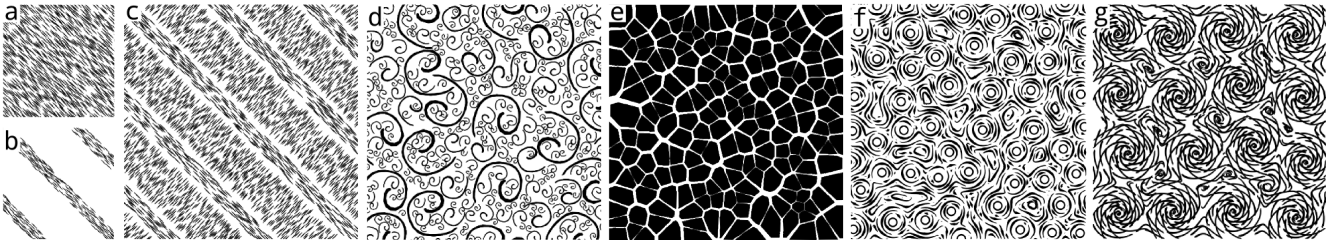


FIGURE 2.17 : Textures variées représentatives des recherches en rendu non photoréaliste par Bénard *et al.* [2009].

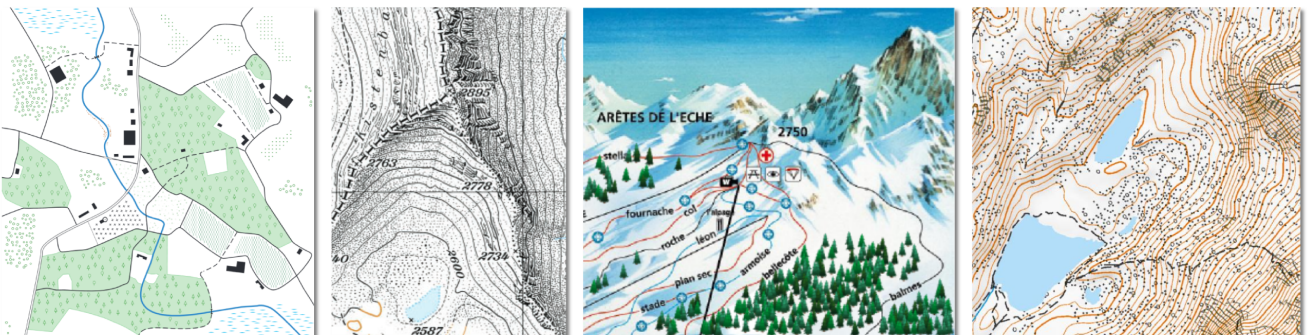
¹⁶Nathan Woodrow détaille sa méthodologie de conception sur son blog à l'adresse suivante : <http://nathanw.net/2013/05/02/svg-textures-in-qgis/>

FIGURE 2.18 : Textures vectorielles par [Loi et al. \[2013\]](#).

Des méthodes de dessin à l'effet du rocher ont été mises en place dans l'optique de reproduire les méthodes de dessin utilisées dans le passé par les dessinateurs cartographes. Ainsi, [Gilgen et Jenny \[2010\]](#), [Jenny et al. \[2014\]](#) et [Geisthövel et Hurni \[2013\]](#) proposent des méthodes de symbolisation visant à reproduire les rochers des cartes suisses, tandis que [Lysák et Traurig \[2013\]](#) s'attachent à reproduire le style des rochers des cartes tchèques et [Loi \[2013\]](#) celui des cartes de l'IGN (Cf. figure 2.19).

FIGURE 2.19 : Méthodes de dessin automatique du rocher par [Gilgen et Jenny \[2010\]](#), [Lysák et Traurig \[2013\]](#) et [Loi \[2013\]](#).

Le positionnement de symboles au sein d'une surface a également été abordé pour améliorer la symbolisation des zones de forêt [[Jenny et al., 2010a](#); [Landes et al., 2013](#)] ou des zones d'éboulis dans la montagne [[Jenny et al., 2010b](#); [Hurtut et Lecordix, 2011](#)] (Cf. figure 2.20).

FIGURE 2.20 : Méthodes de génération d'un semis de symboles cartographiques par [[Jenny et al., 2010a](#)], [Landes et al. \[2013\]](#) [Jenny et al. \[2010b\]](#) et [Hurtut et Lecordix \[2011\]](#).

Ces travaux d'intégration illustrent parfaitement le potentiel d'utilisation de méthodes de rendu issues de l'informatique graphique pour la conception cartographique. Il ne s'agit pas uniquement d'une opportunité technologique mais bien d'élargir la palette de méthodes de symbolisation disponibles afin de retrouver le côté artistique de la cartographie en utilisant des outils de travail à la fois plus complexes, plus sophistiqués et plus expressifs. Cependant, ces méthodes sont beaucoup utilisées pour augmenter le réalisme de la représentation, mais très peu pour répondre aux défis posés par la conception de représentation mixte.

2.2.4 Continuum de styles cartographiques

La diversité des méthodes graphiques permettant de rendre une représentation plus abstraite ou réaliste nous invite à penser qu'il est possible de contrôler le niveau de réalisme ou d'abstraction pour l'adapter à un besoin ou un usage particulier ou encore pour créer différents niveaux de stylisation au sein d'un continuum de styles. [Medley et Haddad \[2011\]](#) dressent l'historique des propositions de continuum de représentations plus ou moins réalistes, allant généralement de la photographie couleur au pictogramme épuré ou au texte en passant par la photographie noir et blanc, le dessin réaliste, le croquis, etc. En étudiant les mécanismes perceptifs qui permettent de juger du niveau de réalisme d'une représentation, ils prouvent l'universalité de cette perception en faisant classer des représentations de différents niveaux de réalisme à un panel d'utilisateurs. Les continuum-réponses ainsi obtenus sont homogènes. En conséquence, les auteurs avancent l'hypothèse que les représentations plus réalistes sont utiles à la résolution du problème d'homogénéité (i.e. consistant à distinguer deux individus d'une même catégorie), tandis que les représentations plus abstraites permettent de répondre au besoin de catégorisation des individus (i.e. consistant à distinguer deux individus de deux catégories différentes).

En conséquence, différents travaux se sont intéressés au contrôle du degré de réalisme ou d'abstraction d'une représentation. Ils ont parfois conduit à la construction de continuums stylisés, consistant généralement à la génération d'un ensemble de représentations à partir d'une même méthode de rendu ou de symbolisation en faisant varier progressivement les paramètres de ladite méthode. De plus, en informatique graphique, une attention particulière est portée sur le contrôle de l'utilisateur sur la représentation finale en vue de lui permettre une personnalisation avancée. Ceci implique l'existence de paramètres sophistiqués permettant de doser les effets visuels offerts par les méthodes de rendu et donc la possibilité de créer des représentations plus ou moins expressives, stylisées, ou artistiques (Cf. figure 2.22). Par exemple, [Lasram et al. \[2012\]](#) utilisent et adaptent les paramètres d'une méthode de génération de texture procédurale afin de construire un élément visuel d'aide au paramétrage de ladite texture sous la forme de sliders texturés progressivement. De même, [Biljecki et al. \[2014\]](#) proposent des métriques de description du niveau de détail et les utilisent pour construire des échelles discrètes de niveau de détail. Enfin, [Döllner et al. \[2006\]](#) identifient trois styles pertinents pour la représentation d'un modèle 3D de ville (photoréaliste, informatif et illustratif) que [Semmo et al. \[2012\]](#) intègrent dans un continuum de représentations. Les auteurs proposent aussi d'utiliser progressivement les paramètres des méthodes de rendu pour réaliser des transitions entre différents degrés d'abstraction et présentent différentes stratégies pour la répartition des niveaux d'abstraction au sein de la représentation en se basant sur la distance au centre de l'image ou sur la saillance des objets représentés.

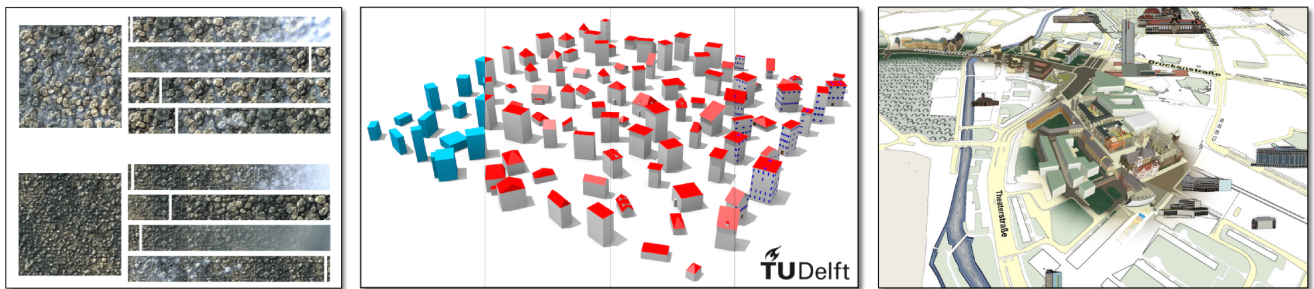


FIGURE 2.21 : Exemples de continuums de styles réalisés par paramétrisation progressive des méthodes de rendu : Slider texturé par Lasram *et al.* [2012], Modèles 3D de ville par Biljecki¹⁸, Visualisation de degré d'abstraction localement inhomogène par Semmo *et al.* [2012].

Afin d'améliorer les rendus de chaque niveau d'abstraction, Semmo *et al.* [2013] proposent ensuite des méthodes paramétrables pour le rendu des rivières selon un style plus ou moins cartographique; et Semmo et Döllner [2014a] présentent une méthode de rendu pour créer des textures plus ou moins complexes selon la profondeur dans la scène représentée et le degré d'abstraction souhaité.

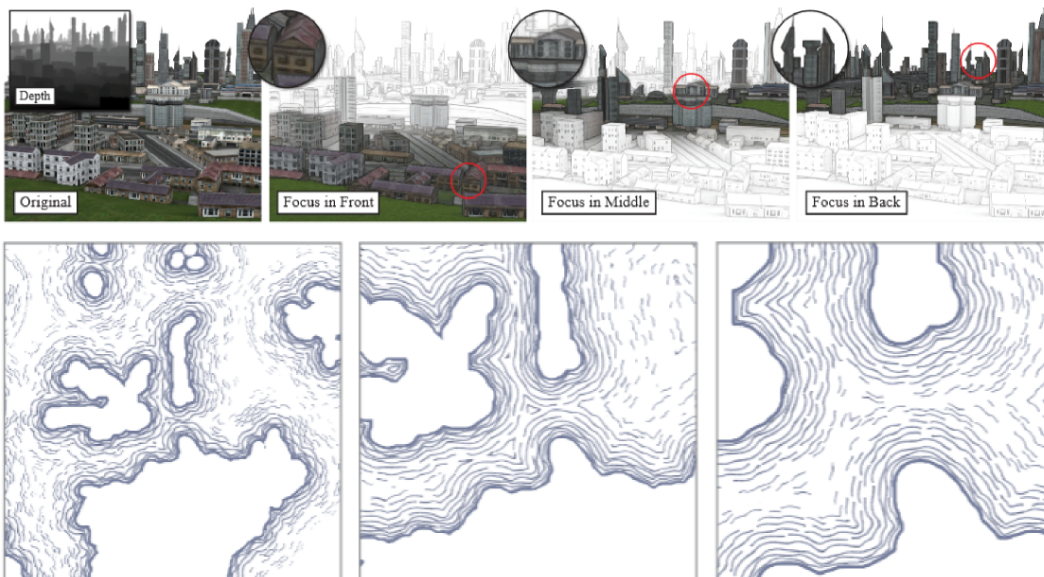


FIGURE 2.22 : Rendu paramétrable des textures [Semmo et Döllner, 2014a], et des rivières [Semmo *et al.*, 2013].

Le contrôle du degré de réalisme ou d'abstraction d'une représentation est également étudié sous l'angle de l'interaction avec la représentation. Dans ce cadre, Semmo et Döllner [2014b] proposent une méthode d'interaction gestuelle tactile directement dédiée à la manipulation interactive du degré de réalisme et d'abstraction du style dans une représentation cartographique.

¹⁸Modèles 3D de différents niveaux de détail consultables en ligne : <https://filipbnl.wordpress.com/>.



FIGURE 2.23 : Outil interactif de manipulation du degré d'abstraction par [Semmo et Döllner \[2014b\]](#).

2.2.5 Influence du degré de réalisme sur la perception de l'utilisateur

En terme d'évaluation de représentations cartographiques mixtes, l'attention de plusieurs travaux se porte sur l'influence du degré de réalisme ou d'abstraction sur l'utilisateur. Différentes **méthodes d'évaluation** sont mises en œuvre, allant de l'enquête utilisateur diffusée sur internet [[Boér et al., 2013](#)], aux tests utilisateur [[Raposo et Brewer, 2011](#); [Wilkening et Fabrikant, 2011](#)] en passant par l'utilisation d'outils de suivi du regard [[Dong et al., 2014](#)]. Cependant, on note une communauté indéniable de questionnements de recherche fédérée par une homogénéité certaine dans la définition du degré de réalisme ou d'abstraction et dans sa mise en œuvre pour la réalisation des supports visuels pour l'évaluation.

L'évaluation de l'influence du degré de réalisme est toutefois très diverse en ce qui concerne le **facteur supposé être influencé par le degré de réalisme ou d'abstraction**. [Raposo et Brewer \[2011\]](#) enquêtent sur les préférences esthétiques de l'utilisateur et la corrélation entre degré de réalisme et type de contexte géographique. [Appleton et al. \[2002\]](#) s'intéressent au besoin en données, à la facilité d'utilisation et à la qualité de la représentation selon le degré de réalisme. [Wilkening et Fabrikant \[2011\]](#) évaluent comment différents types de représentations (carte, orthoimages ou superpositions de carte et image) peuvent influencer la prise de décision, en particulier pour une tâche complexe de détection de pente (donc en trois dimensions) : les auteurs démontrent que les utilisateurs, même s'ils préfèrent des cartes plus réalistes, ne réussissent pas mieux leur tâche avec ce type de représentation. [Zanola et al. \[2009\]](#) s'intéressent à l'effet du niveau de réalisme du style (style photoréaliste, style technique (CAO - Cartographie assistée par ordinateur), style croquis) dans la confiance en la qualité des données, en particulier d'un modèle urbain 3D. [Engel et al. \[2013\]](#) s'interrogent sur la perception d'une information thématique visualisée sur un modèle 3D avec différentes méthodes de rendu plus ou moins réalistes. Une synthèse globale rapide de ces résultats confirme une influence du degré de réalisme d'une représentation sur les différents aspects étudiés expérimentalement par les travaux ci-dessus.

Par ailleurs, [Boér et al. \[2013\]](#) questionnent l'utilisabilité de différentes représentations cartographiques : leur adéquation à la réalisation correcte et/ou rapide de tâches cartographiques plus ou moins complexes est évaluée au regard du degré de réalisme de la représentation. Les auteurs concluent à l'existence d'une corrélation entre la tâche cartographique à réaliser et le degré de réalisme de la représentation : certains degrés de réalisme sont plus adaptés que d'autres à la réalisation d'une tâche donnée.

Enfin, une autre crainte non évaluée est tout de même formulée par Joliveau qui questionne le rôle des visualisations réalistes dans la gestion du territoire [[Joliveau, 2005](#)] et pressent la

possibilité d'utiliser des méthodes trop réalistes pour faire croire à une fausse réalité qu'il nomme *leurre géonumérique* [Joliveau, 2014a].

2.3 Explorer des méthodes de rendu mixtes

Notre objectif de conception de représentations mixtes et réalistes nous invite à explorer des méthodes de rendu issues de domaines extérieurs à la cartographie. En effet, les méthodes de symbolisation cartographique, bien que largement éprouvées et théorisées, semblent limitées et insuffisantes pour créer de telles représentations. Ainsi, il s'agit par cette exploration de distinguer ce qui tient de l'opportunité technologique d'utiliser des méthodes de rendu très sophistiquées en cartographie : la représentation cartographique en sera-t-elle plus efficace, esthétique et/ou originale ?

De plus, dans les domaines de l'informatique graphique et de la visualisation d'information, des méthodes d'aide à la conception sont mises en place afin de fournir aux designers, infographistes, artistes, etc. des outils permettant de stimuler la créativité et garantissant un résultat graphique de qualité. Comment s'inspirer de ce potentiel pour appliquer ou adapter ces méthodes à la conception de représentations cartographiques mixtes ?

Méthodes de rendu réaliste pour contrôler le degré de réalisme

Le potentiel graphique des méthodes de rendu réaliste décrites au paragraphe 2.2.2 nous incite à revisiter les méthodes de symbolisation cartographique en les combinant avec ces méthodes plus sophistiquées. Cette approche semble prometteuse pour répondre aux défis graphiques de mélange visuel de différentes représentations. En effet, l'utilisation de méthodes de génération ou de synthèse de textures nous permettrait à la fois de contrôler le niveau de réalisme des objets cartographiques et de réduire l'écart existant entre une carte topographique et une orthophotographie.

De plus, les effets visuels provoqués par les méthodes de rendu réaliste peuvent être utilisés pour mettre en valeur des objets cartographiques pertinents. Par exemple, différents niveaux de degré de réalisme peuvent permettre de distinguer des objets d'importance variée. Dans l'exploration de ces méthodes dans un contexte cartographique, il sera donc nécessaire de trouver le bon compromis entre la complexité visuelle apportée par l'utilisation de méthodes de rendu plus sophistiquées et l'apport de lisibilité introduit par ces mêmes méthodes de rendu.

Méthode de conception par l'exemple pour s'inspirer de l'orthophoto

Les méthodes par l'exemple permettent à l'utilisateur de fournir un exemple du résultat qu'il souhaite obtenir. Il s'agit ensuite d'analyser les caractéristiques graphiques de cette image puis de les réinjecter dans l'image finale. L'enjeu de ce type de méthode est de rester fidèle à l'image exemple sans créer d'artefact visuel dans l'image à créer [Thollot, 2008].

Texturer par l'exemple Cette approche est adoptée pour synthétiser des textures réalistes, artistiques ou illustratives. Wei *et al.* [2009] dressent un état de l'art comparatif des méthodes de synthèse de texture par l'exemple. En cartographie, Jenny et Jenny [2013] proposent d'utiliser des échantillons issus de panoramas de montagne artistiques en vue de texturer des plans de pistes de ski de façon expressive (Cf. figure 2.24).

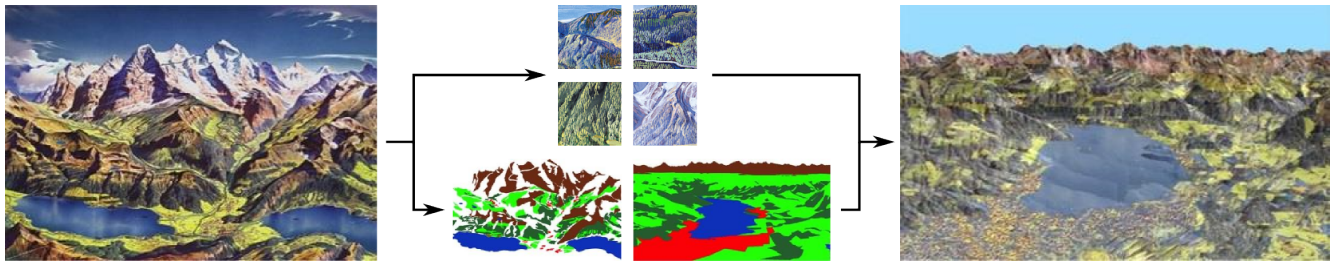


FIGURE 2.24 : Panorama artistique texturé par l'exemple, par Jenny et Jenny [2013].

Extraction et transferts de couleurs Une partie des méthodes par l'exemple se concentrent sur le transfert de la distribution colorée. Cet objectif suppose d'extraire les couleurs d'une image cible afin de les réintégrer dans l'image source que l'on souhaite (re-)coloriser. Barla [2006] dresse un état de l'art des méthodes de transfert de couleurs avant de proposer une méthode d'extraction d'une palette de couleurs visant à conserver des catégories de couleurs fidèles à la perception humaine. La figure 2.25 présente un exemple de résultat de cette méthode automatique sur une photo de paysage montagneux.



FIGURE 2.25 : Exemple d'extraction automatique d'une palette de couleur, par Barla [2006].

En cartographie, Christophe *et al.* [2013] présentent une méthode d'extraction de couleurs pertinentes pour la cartographie, c'est-à-dire des couleurs saillantes, bien contrastées et utiles à la représentation conventionnelle de thèmes cartographiques incontournables comme la végétation ou l'hydrographie. Ces palettes de couleurs ont vocation à être présentées à l'utilisateur comme source d'inspiration dans le modèle de conception de légende originales et créatives de Christophe [2009]. On retrouve ici les deux phases primordiales des méthodes par l'exemple, intégrées à un processus automatique de conception cartographique personnalisée.

Couleurs et texture naturelles issues de l'orthophoto Dans notre travail de thèse, nous utilisons les orthophotos à la façon des méthodes par l'exemple, comme source d'inspiration graphique. Pour cela, nous nous inspirons des méthodes par l'exemple mais ne les réutilisons pas directement. En effet, les exemples de transferts de couleurs présentés en figure 2.26 indiquent que ce type de méthode traitant l'image globalement n'est pas adapté à notre problématique. En

effet, le transfert brut des couleurs issues d'un paysage naturel (vue du ciel ou du sol) provoque une dégradation importante de la qualité cartographique : le résultat obtenu donne une impression visuelle trop sombre et présente des couleurs trop peu différenciables.

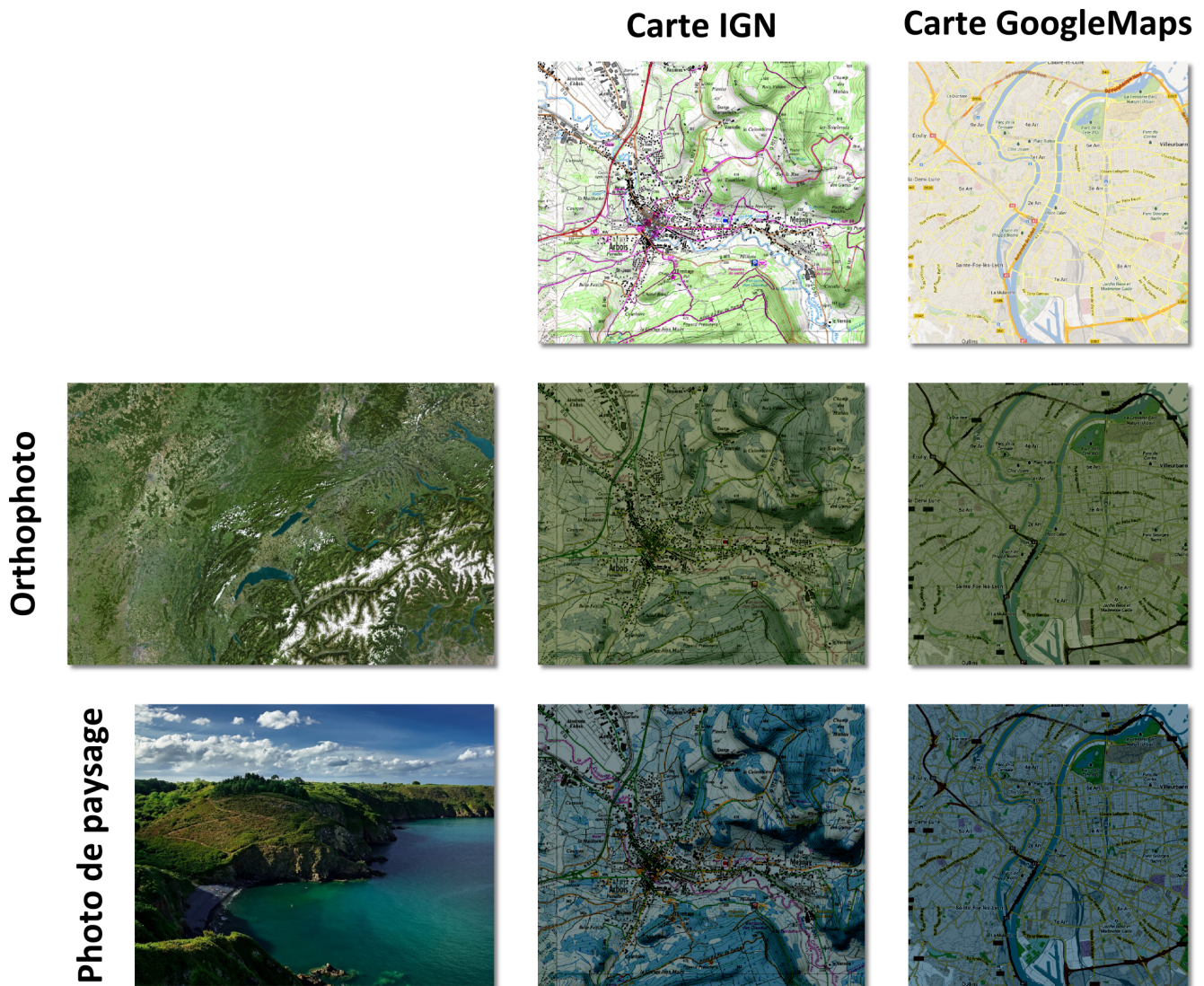


FIGURE 2.26 : Transferts de couleurs d'une orthophoto et d'une photo de paysage dans des cartes topographiques selon la méthode de Xiao et Ma [2006], réalisés par Arbelot [2012].

En conséquence, nous souhaitons extraire puis ré-injecter dans le processus cartographique des caractéristiques graphiques pertinentes de l'orthophotographie. La détermination de ces caractéristiques graphiques est une problématique propre à notre travail et sera détaillée dans les chapitres suivants. Les méthodes d'extraction de couleur et de texture issues des méthodes par l'exemple seront également utilisées de façon spécifique pour atteindre notre objectif tout en assurant une bonne qualité cartographique. Enfin, des méthodes de rendu sophistiquées seront également utilisées afin de réinjecter les caractéristiques extraites pour créer une représentation cartographique mixte s'inspirant de l'orthophotographie.

Comme évoqué au paragraphe 2.2.2, l'intégration de fond orthophotographique est une façon d'augmenter le réalisme de la représentation cartographique. Notre démarche d'utilisation

de l'orthophotographie comme source d'inspiration graphique pourrait donc avoir des résultats similaires à l'utilisation de méthodes de rendu réaliste en ce qui concerne le contrôle du degré de réalisme. Pour approfondir cela, nous réalisons un test utilisateur (Cf. § 4.3) visant à évaluer quel moyen graphique est plus propice au contrôle du degré de photoréalisme : les méthodes de rendu réaliste, l'intégration d'un fond orthophotographique brut, ou l'injection de caractéristiques graphiques issues de l'orthophotographie ?

Méthode de conception par briques élémentaires

Un autre type de méthode de conception que l'on retrouve à la fois en informatique graphique et en symbolisation cartographique est celui des méthodes de combinaison de briques de symbolisation élémentaires. [Stolper et al. \[2014\]](#) décomposent les briques élémentaires de construction d'un graphe et proposent des combinaisons types de ces briques permettant de construire des formes courantes de graphiques comme un diagramme circulaire ou une matrice d'adjacence colorée. En cartographie, [Brewer \[1999\]](#) identifie quatre types de palettes de couleurs (binaire, divergent, séquentiel et qualitatif) et des moyens graphiques de les combiner. De même, dans son modèle d'aide à l'exploration des propriétés structurelles d'un réseau de transport, [Mermet \[2011\]](#) dégage quatre leviers "permettant de contrôler les paramètres d'analyse des réseaux de transports" (l'espace, la mesure, la vue et la légende) associés à des opérateurs de combinaison des leviers entre-eux en vue de faciliter l'exploration du réseau à analyser. Ces méthodes de conception par briques sont parfois accompagnées d'un langage graphique permettant de représenter les éléments en entrée et sortie de la méthode, et les briques à combiner. La figure 2.27 présente les langages graphiques associés aux deux méthodes de combinaison de légendes cartographiques que nous venons de décrire.

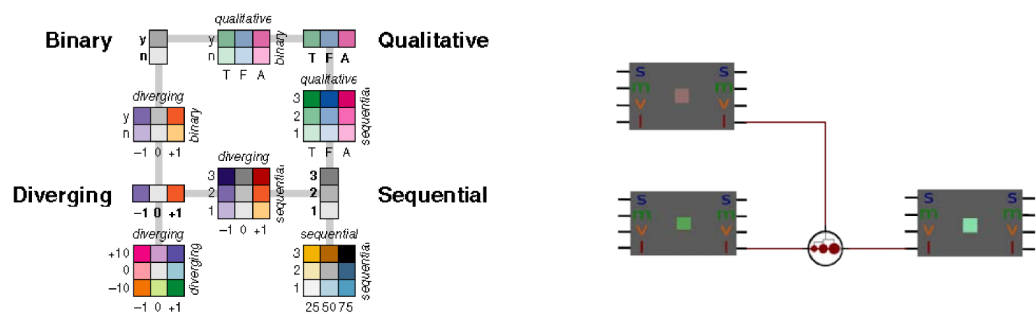


FIGURE 2.27 : Langages graphiques de combinaison de briques de légende cartographique : pour la cartographie thématique à gauche par [Brewer \[1999\]](#), et dans l'outil d'exploration de réseau Geographlab à droite par [Mermet \[2011\]](#).

Dans notre travail de thèse, nous entendons nous inspirer de ce principe de conception en proposant des méthodes de symbolisation cartographique adaptées aux différentes données que nous souhaitons covisualiser. Ce type de méthode permettrait d'utiliser conjointement différentes méthodes de symbolisation cartographique ou de rendu et de les combiner pour gérer indépendamment les différents éléments de la représentation afin de satisfaire les différentes exigences cartographiques que nous nous sommes fixées (lisibilité, continuité, homogénéité).

Deuxième partie

Représenter l'intermédiaire pour naviguer entre deux extrêmes



Chapitre 3

Approche générale : représentations mixtes et intermédiaires

NAVIGUER entre plusieurs représentations cartographiques différentes a été identifié comme un besoin émergent dans la première partie de ce mémoire. Plus particulièrement, nous avons identifié deux représentations cartographiques emblématiques fréquemment proposées conjointement à l'utilisateur muni d'un outil interactif pour passer de l'une à l'autre ou les covisualiser, la carte topographique et l'orthophotographie.

Dans ce chapitre, nous présentons notre approche pour la conception de représentations cartographiques mixtes et intermédiaires. Ces représentations sont conçues en tant que représentations cartographiques mixtes intégrant des informations et éléments graphiques de chaque extrémité du continuum, et en tant que transition entre deux extrêmes fixés. Notre approche est guidée par la volonté d'apporter une expertise cartographique au concepteur de continuum en lui fournissant une méthode permettant de concevoir un continuum valide cartographiquement. C'est pourquoi notre approche s'appuie sur trois grands principes détaillés dans ce chapitre : la nécessité d'adaptation locale de la symbolisation des données vectorielles superposées des fonds cartographiques ou orthophotographiques pour assurer la lisibilité de chaque représentation intermédiaire (Cf. § 3.1), la création de transitions graphiques pour établir une continuité entre représentations cartographiques intermédiaires successives (Cf. § 3.2), et la synchronisation des symbolisations visant à garantir une homogénéité visuelle et stylistique de ces représentations mixtes (Cf. § 3.3). Ainsi, nous entendons relever le double défi d'assurer la lisibilité et l'efficacité de chaque représentation intermédiaire formant le continuum, tout en garantissant une continuité et une progression constantes dans la navigation au sein du continuum de styles.

3.1 1^{er} principe : nécessité d'une adaptation locale pour la lisibilité des symbolisations

Nous avons vu dans la partie I que la nature de l'information contenue dans une orthophotographie est différente de celle d'une carte topographique. De plus, plusieurs facteurs font de l'orthophotographie un fond visuellement différent des fonds cartographiques. C'est pourquoi l'intégration d'un fond orthophotographique est identifiée dans la littérature comme un défi pour la conception cartographique. Donnay [2000] exhorte déjà les cartographes à appliquer les principes de la sémiologie graphique aux représentations utilisant un fond orthophotographique. Cependant, les spécificités de l'utilisation d'un fond orthophotographique sont très peu prises en compte dans le processus cartographique classique actuel. Dans ce contexte, nous étudions la diversité visuelle des fonds orthophotographiques, en la comparant à celle des cartes topographiques, en vue de définir un processus de traitement d'une orthophoto permettant son intégration dans une représentation cartographique mixte, et de proposer des solutions graphiques répondant aux questions suivantes :

- Quelle méthode de rendu est adaptée à la symbolisation d'une orthophoto ?
- Peut-on envisager d'utiliser d'autres méthodes que la symbolisation en couleur ou en fausses couleurs ?
- En quoi ces méthodes sont plus ou moins adaptées à la conception de représentation cartographique mixte ?
- Comment caractériser graphiquement un fond cartographique ou orthophotographique ?
- Quelles méthodes de symbolisation de données vectorielles superposées à un tel fond sont-elles adaptées ?

Diversité visuelle des orthophotographies et des cartes topographiques Dans ce paragraphe, nous analysons l'impact visuel d'une orthophotographie, et le comparons à celui d'une carte topographique. Pour cela, seize extraits ont été sélectionnés sur le territoire français métropolitain, avec la volonté de construire un panorama varié d'environnements géographiques. La figure 3.1 présente des extraits d'orthophotographies de ces paysages. Ces représentations sont toutes présentées à la même échelle. De plus elles ont été réalisées selon un processus identique et standardisé de traitement d'images. Ce processus implique des étapes de correction et d'égalisation de la couleur des différentes prises de vues. Ainsi, ce ne sont pas les couleurs directement acquises qui sont représentées mais bien celles qui sont issues de ces traitements visant à rendre l'information colorimétrique plus fidèle à la réalité.

Notre panel d'orthophotographies illustre la diversité des contextes et objets géographiques, et des impacts visuels résultants lorsqu'ils sont photographiés depuis le ciel. Il présente des zones urbaines, montagneuses, rurales, littorales, agricoles, forestières, etc. et des objets géographiques variés : bâtiments, routes, mer, rivières, champs cultivés, chemins, forêts, volcans, baies, sables, dunes, montagnes, collines, parcs, îles, pelouses, villages, centres ville, falaises, etc. Cette diversité constitue un défi de représentation pour le cartographe visant à en concevoir une représentation standardisée comme c'est le cas des producteurs de cartes topographiques en série comme l'IGN.

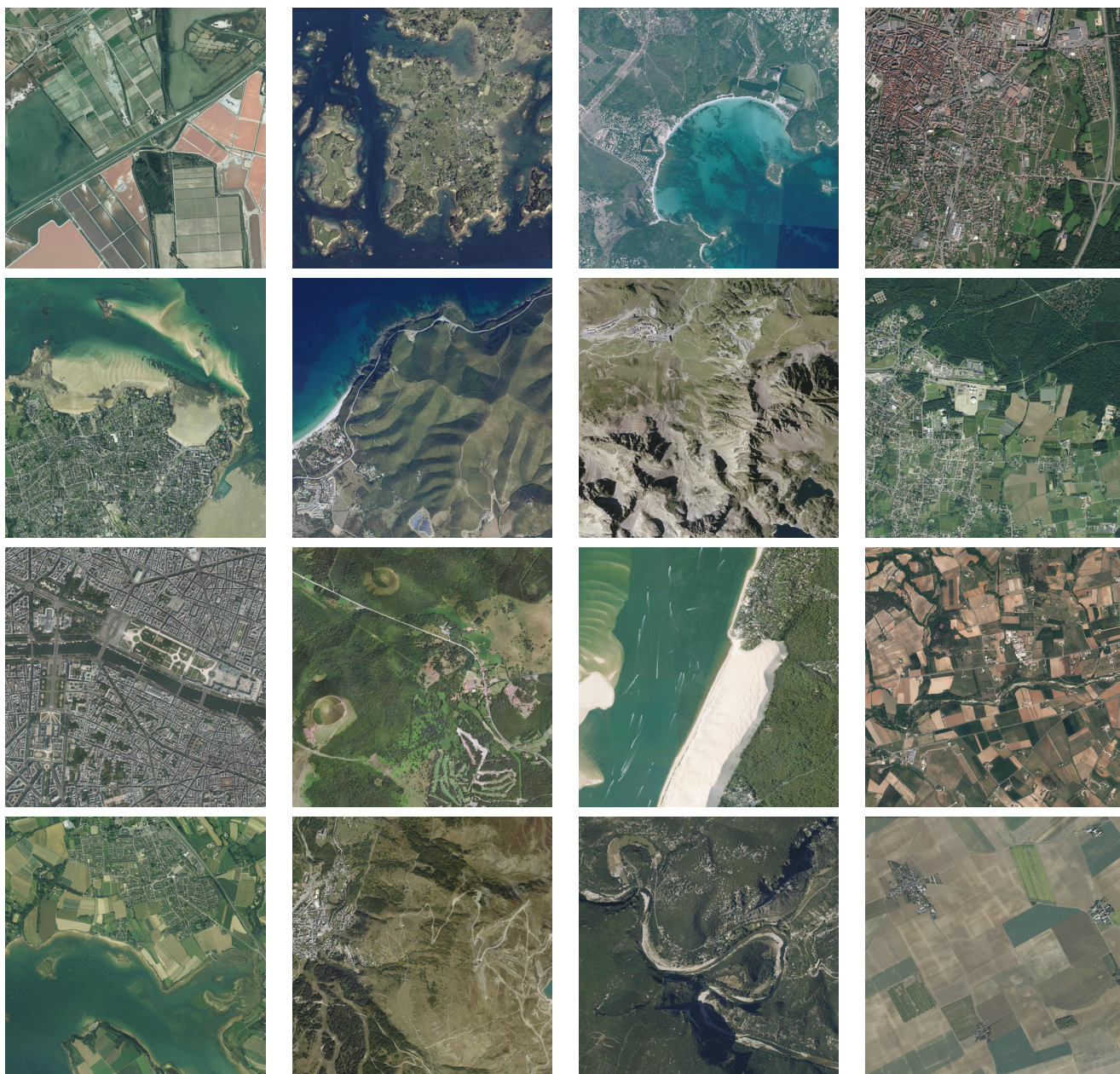


FIGURE 3.1 : Panel d'orthophotographies du territoire français métropolitain (BD ORTHO®).

Dans le même esprit, la figure 3.2 présente des extraits des cartes topographiques correspondant aux mêmes emprises géographiques que les orthophotos de la figure 3.1. Ce panel présente lui aussi des représentations ayant un impact visuel très différent, bien qu'elles aient toutes été conçues selon le même processus standardisé. L'enjeu de cette comparaison entre deux panels de représentations topographiques (cartographiques et orthophotographiques) est de confronter l'influence du style de ces représentations et celle des objets géographiques représentées sur l'impact visuel provoqué par ces représentations.



FIGURE 3.2 : Panel de cartes topographiques du territoire français métropolitain (SCAN 25®).

Composition colorée En vue de caractériser l'impact visuel de ces représentations du monde, nous analysons leur composition colorée. Nous nous intéressons plus particulièrement à la luminosité et à la saturation des couleurs des orthophotos et cartes de notre panel. Notre objectif est de qualifier la clarté et la vivacité des couleurs des orthophotos en les comparant à celle des cartes, tout d'abord globalement pour chaque échantillon de notre panel, puis en analysant la distribution des couleurs de chacun de leurs pixels.

Les calculs colorimétriques ont été réalisés dans le système colorimétrique CIELab disposant d'une distance entre couleurs fidèle à la perception humaine [CIE, 1976]. Les résultats sont ensuite présentés dans les figures 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.9 et 3.10 selon le système colorimétrique CIELCh qui est une version en coordonnées cylindriques du système CIELab. Ce système possède

les mêmes propriétés perceptuelles que le système CIELab puisqu'il organise les couleurs de la même façon, et les traduit selon leur luminosité, leur saturation et leur teinte. Ces dimensions sont plus intuitives que celles du système CIELab, car elles correspondent à l'interprétation visuelle permettant de juger de la clarté, de la vivacité et de tonalité chromatique d'une couleur [Chrisment, 2010].

Analyse globale L'analyse des luminosités moyennes des différentes représentations indique que les cartes topographiques de l'IGN sont dans l'ensemble beaucoup plus claires que l'orthophoto correspondante (Cf. figure 3.3). Cela s'explique par l'utilisation d'un fond de carte clair (blanc avec un ombrage cartographique léger), et une légende présentant des aplats de couleurs également clairs comme le bleu utilisé pour l'hydrographie et le vert de la végétation. La carte 9 représentant le centre de Paris fait office d'exception. En effet, elle représente un territoire urbanisé dense et comporte donc un grand nombre de bâtiments (représenté en gris foncé) et d'îlots urbains (représentés en noir), ce qui constitue une image plus foncée que celle des autres cartes du panel.

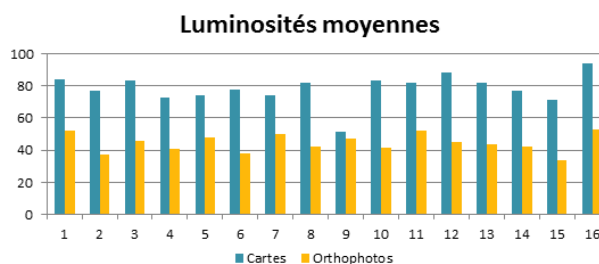


FIGURE 3.3 : Luminosités moyennes pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.

L'analyse des saturations moyennes est moins significative en termes de différence globale de couleurs entre les orthophotos et les cartes (Cf. figure 3.4). Néanmoins, dans la majorité des couples de notre panel (12 sur 16), les couleurs de la carte sont plus vives que celles de l'orthophoto. De plus, les orthophotos présentent des saturations plus similaires entre elles que celles des cartes. Il semble donc que les orthophotos soient généralement plus ternes que les cartes, même si ce n'est pas toujours le cas.

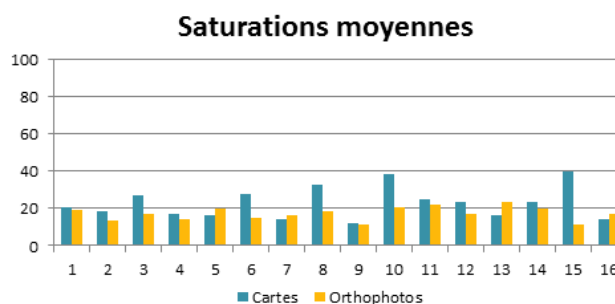


FIGURE 3.4 : Saturations moyennes pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.

Diversité colorée Pour compléter ce portrait global des couleurs des différentes représentations, nous analysons la dispersion des distributions colorées de chaque représentation de notre panel afin d'apprécier sa diversité colorée.

Les écarts types des luminosités et des saturations présentés en figures 3.5 et 3.6 attestent que les orthophotos sont plus homogènes en termes de clarté et de vivacité que les cartes. Combinées aux conclusions précédentes, ces analyses globales laissent présager que les distributions colorées des orthophotos présenteront des couleurs foncées et ternes dans l'ensemble.

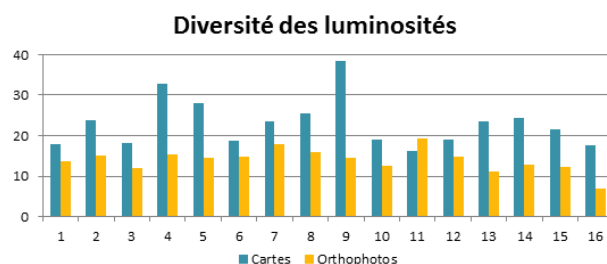


FIGURE 3.5 : Diversité des luminosités pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.

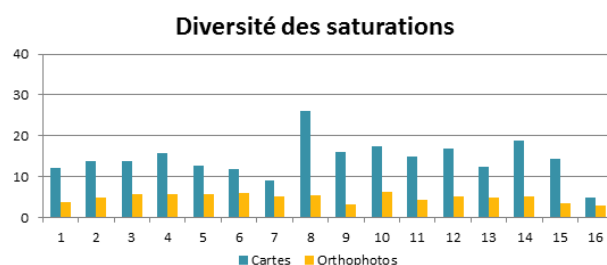


FIGURE 3.6 : Diversité des saturations pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.

En revanche, l'analyse des écart-types de teintes présentés en figure 3.7 ne permet pas de tirer de conclusion générale sur l'ensemble des orthophotos, ni sur leur comparaison avec les cartes correspondantes.

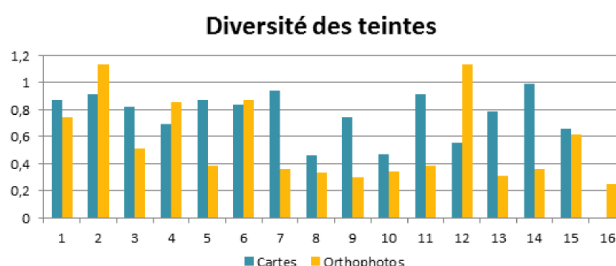


FIGURE 3.7 : Diversité des teintes pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.

Synthèse colorée Nous analysons dans ce paragraphe les distributions colorées des orthophotographies et des cartes de notre panel, sous la forme de deux représentations synthétiques proposées par Jégou [2013]. Les figures 3.9 et 3.10 présentent les échantillons d'orthophotos et de cartes de notre panel ainsi que leurs distributions colorées. Ces distributions ont été réalisées avec l'outil de synthèse colorée proposé par Laurent Jégou¹. Cet outil permet d'analyser et de représenter les proportions de couleurs et les relations entre les couleurs d'une image. Les synthèses colorées des figures 3.9 et 3.10 représentent les couleurs des images par des cercles proportionnels au nombre de pixels correspondants et selon deux systèmes de coordonnées polaires. Comme illustrée par l'exemple de synthèse colorée de la figure 3.8, dans le graphique de gauche, la luminosité est représentée par la coordonnée radiale et la teinte par la coordonnée angulaire, tandis que dans le graphique de droite, la saturation est représentée par la coordonnée radiale et la teinte par la coordonnée angulaire. Ainsi, dans le graphique de gauche, plus une couleur est foncée plus elle est centrale, et plus elle est claire plus elle est excentrée. De même, dans le graphique de droite, plus une couleur est terne plus elle est centrale, et plus elle est vive plus elle est excentrée. La teinte varie de la même façon dans les deux graphiques, par rapport à l'angle formé par la couleur avec les axes.

Les synthèses colorées de nos panels, présentées aux figures 3.9 et 3.10, confirment les analyses globales des images du panel.

En termes de luminosité, les distributions présentent des couleurs claires en grandes quantités pour les cartes (bleu clair, vert clair et blanc), ce qui correspond aux aplats de la mer, de la végétation, et du fond de carte. Quant aux orthophotos, elles présentent globalement des distributions très sombres. La présence d'objets géographiques très particuliers tels que les bassins salins ou les bancs de sables apportent parfois des touches de clarté mais cela reste très localisé.

En termes de saturation, les couleurs des orthophotos sont globalement ternes. Néanmoins, de même que pour la luminosité, certains objets géographiques ont naturellement une couleur vive, notamment la mer des représentations 3 et 5. En ce qui concerne les cartes, la vivacité est apportée par l'ajout d'informations abstraites représentées par des couleurs très vives telles que le magenta utilisé pour les informations touristiques, le rouge des routes principales ou le vert fluo délimitant les parcs naturels.

Enfin, on remarque que les synthèses colorées des orthophotos sont plus homogènes : avec des paramètres d'échantillonnage et de seuils colorés identiques, beaucoup plus de couleurs différentes ressortent pour les cartes. Cette diversité témoigne d'une recherche de lisibilité par une représentation volontairement très contrastée. De plus, la présence d'un ombrage cartographique (notamment dans les zones vallonnées ou escarpées, comme sur les représentations 6, 7, 10, 14 et 15) est également un facteur important d'augmentation de la diversité colorée.

¹L'outil que nous avons utilisé est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://www.geotests.net/couleurs/v2/index.html?l=fr>.

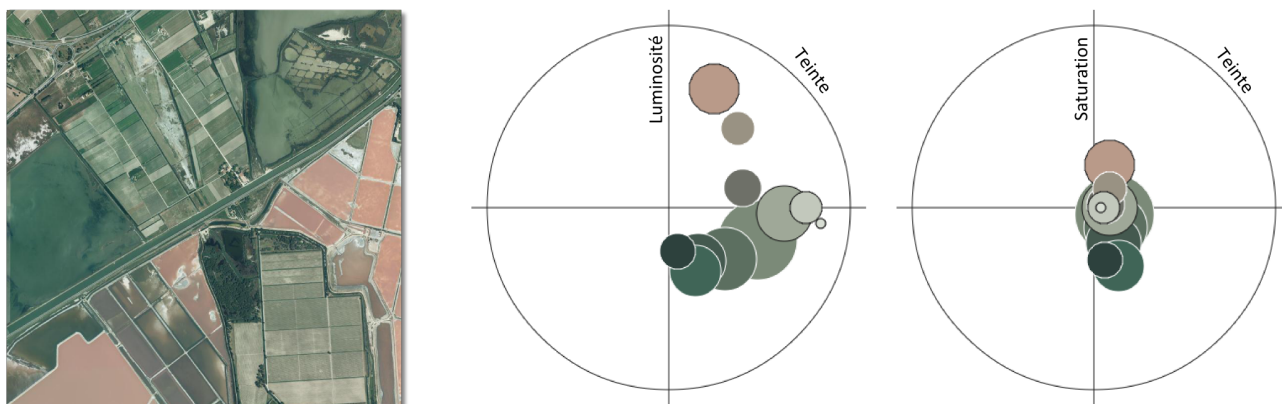


FIGURE 3.8 : Exemple de synthèse colorée

Solution cartographique envisagée La grande diversité visuelle des orthophotographies nous incite à proposer une méthode d'adaptation locale de la symbolisation. Cette méthode sera détaillée au paragraphe 4.2.1. Elle consiste en une caractérisation locale de l'impact visuel engendré par la visualisation d'une orthophoto, d'une carte topographique ou d'une représentation mixte, permettant de déterminer localement une symbolisation optimale pour les objets cartographiques à mettre en valeur. Ainsi, la prise en compte des spécificités du fond utilisé impliquera certainement une remise en question du principe fondamental de symbolisation commune à une famille d'objets cartographiques. Néanmoins, le principe d'adaptation locale de la symbolisation permet potentiellement d'assurer la lisibilité de certains objets à préserver quelque soit le fond de carte.

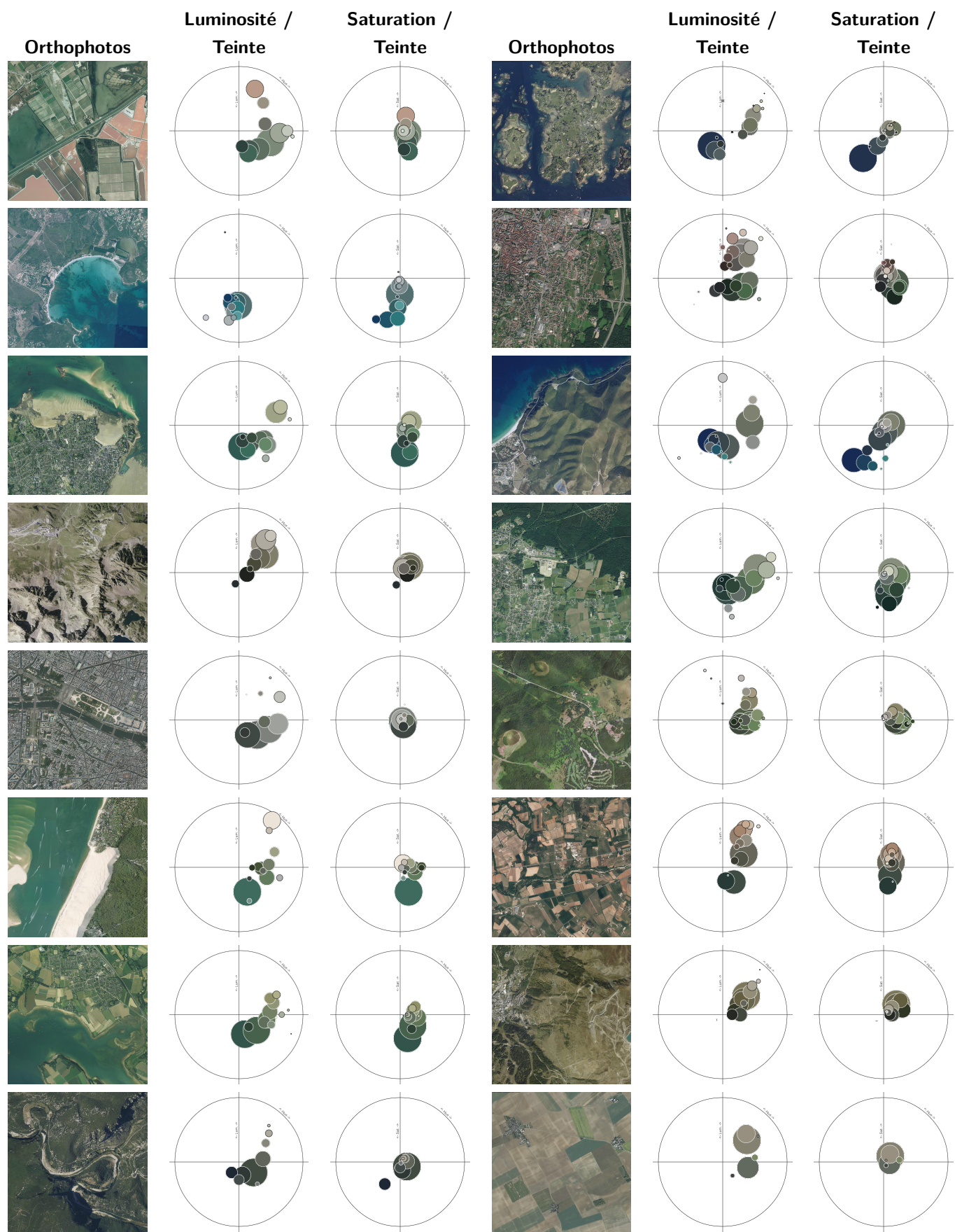


FIGURE 3.9 : Synthèses colorées des orthophotographies de notre panel.

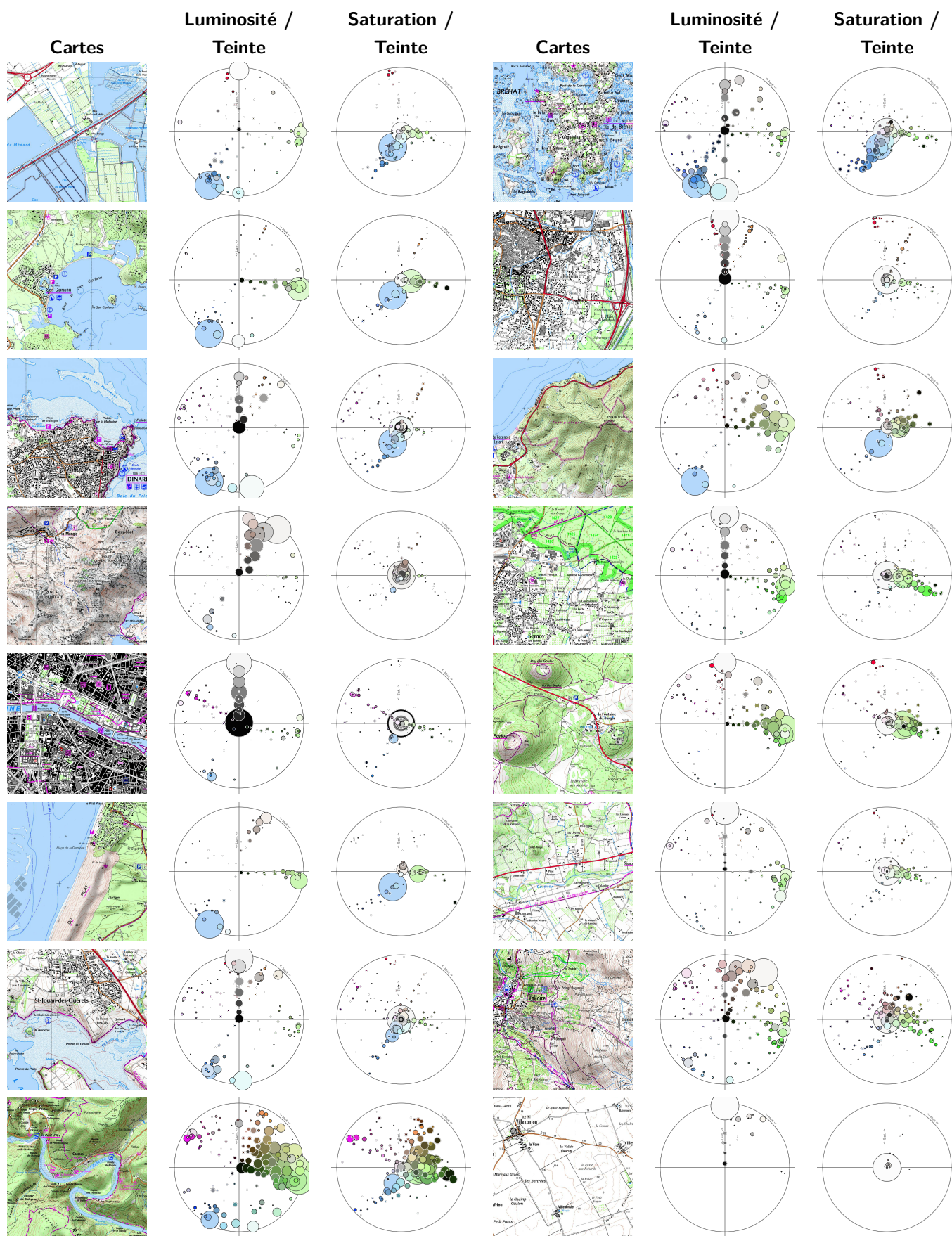


FIGURE 3.10 : Synthèses colorées des cartes topographiques de notre panel.

3.2 2^e principe : transitions graphiques pour la continuité entre représentations intermédiaires

Pour permettre à l'utilisateur de naviguer entre deux représentations de façon continue, sans lui imposer de basculer incessamment d'une représentation à l'autre, nous proposons de concevoir un continuum constitué d'un ensemble cohérent de représentations reliées. La conception d'un tel continuum implique de travailler sur les notions d'intermédiaire, de transition et d'ordonnement de symbolisations.

Des états intermédiaires plutôt qu'un milieu idéal La figure 3.11 présente des exemples de covisualisation par transparence d'une carte topographique et d'une orthophotographie.

Ortho 50% / Carte 50%



Carte 50% / Ortho 50%



Ortho 50% / Carte 100%



Carte 50% / Ortho 100%



FIGURE 3.11 : Exemples de covisualisation par transparence d'une carte et d'une orthophoto.

Les représentations de la figure 3.11 pourraient être considérées comme des "milieux" potentiels entre ces deux représentations car elles ont été réalisées en paramétrant la transparence de l'une ou des deux représentations à 50%. Cependant, il apparaît clairement que ces représentations ne peuvent être considérées ni comme des milieux graphiques satisfaisants, ni comme des représentations cartographiques mixtes acceptables. En effet, ces exemples de covisualisation par transparence présentent des dégradations des caractéristiques graphiques des représentations

mixées, ce ne sont donc pas des milieux graphiques crédibles, d'autant plus qu'ils présentent des éléments peu ou pas lisibles, ce ne sont donc pas non plus des représentations mixtes de qualité.

En conséquence, notre approche est plutôt de construire un ensemble de représentations grâce auquel l'utilisateur est en mesure de se positionner où il le souhaite et de naviguer de façon continue entre ces deux représentations cartographiques que nous appelons des extrémités. Le fait de pouvoir choisir sa représentation parmi un ensemble de représentations liées permettra à l'utilisateur de sélectionner celle qui répond le mieux à son besoin.

Des transitions douces pour une navigation fluide Pour proposer des moyens graphiques de transition entre différentes représentations, nous nous inspirerons des méthodes de rendu progressives faisant varier progressivement leurs paramètres en entrée pour concevoir un panel de représentations similaires pouvant être ordonnées. Cela nous permet d'établir un lien visuel entre les représentations cartographiques intermédiaires.

L'objectif de ces méthodes est d'assurer une continuité visuelle entre deux représentations adjacentes, tout en créant un cheminement graphique entre les extrémités du continuum. Les symbolisations des extrémités du continuum seront donc à la fois un guide et une contrainte a priori pour déterminer les symbolisations des représentations cartographiques intermédiaires. Dans cette optique, des méthodes d'interpolation de symbolisation sont proposées au paragraphe 4.2.2 pour créer des déclinaisons graphiques d'une même symbolisation. Celles-ci devront être suffisamment contrôlables pour pouvoir générer des symbolisations pratiquement similaires et évoluant entre deux symbolisations prédéfinies que sont celles des extrémités du continuum. La progression visuelle de la symbolisation doit être perceptible par l'utilisateur sans créer de rupture visuelle.

Des représentations ordonnées pour créer un chemin graphique régulier Pour assurer la continuité du continuum, il s'agit également de s'assurer que les représentations ainsi construites peuvent être ordonnées de manière consensuelle par un panel varié d'utilisateurs. C'est pourquoi, nous mettons en place un test utilisateur visant à évaluer le degré de réalisme ou d'abstraction perçu pour une symbolisation cartographique donnée et à déterminer s'il existe un ordre consensuel entre des symbolisations plus ou moins abstraites ou réalistes comme celles présentées en figure 3.12.



FIGURE 3.12 : Symbolisations cartographiques de la forêt

Être capable d'ordonner des symbolisations en fonction de la perception de l'utilisateur nous permet d'assurer une continuité de symbolisations et styles cartographiques à nos continuums cartographiques. De plus, l'existence d'un ordonnancement fidèle à l'utilisateur nous permettrait de créer un chemin graphique cohérent parmi l'espace des possibles cartographiques (Cf. figure 3.13).

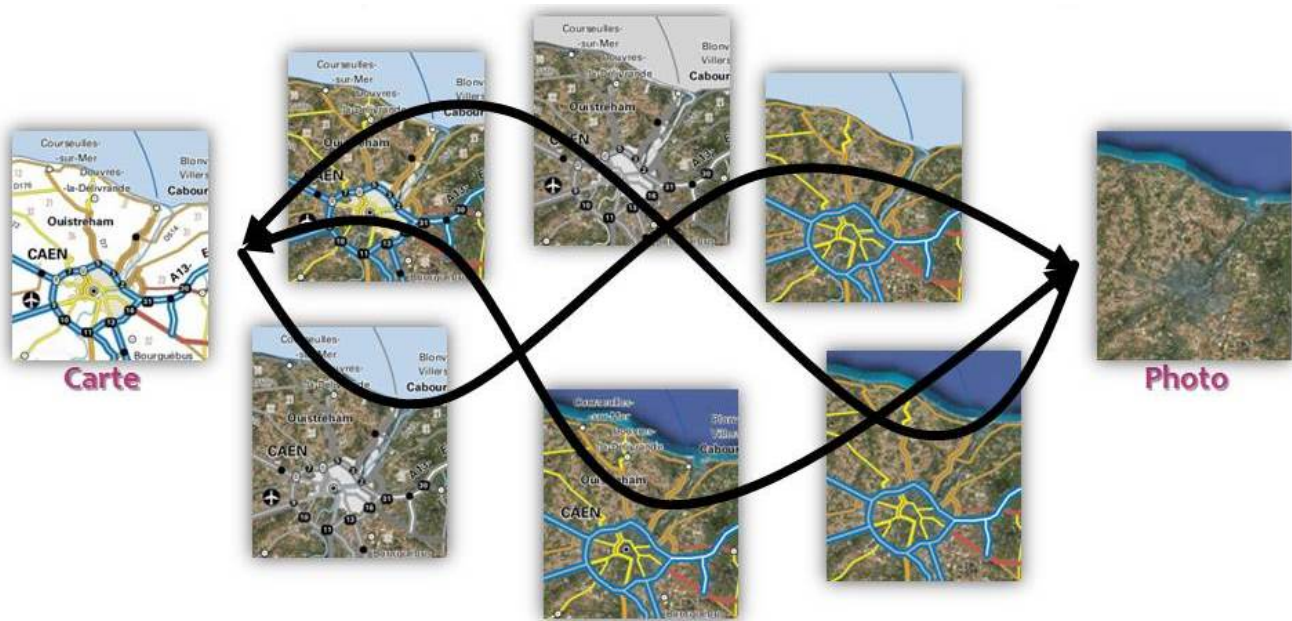


FIGURE 3.13 : Choix de représentations ordonnées pour créer un chemin continu.

Continuum cartographique et interaction utilisateur envisagée Le principe de continuité entre représentations cartographiques intermédiaires est le fondement de la constitution d'un continuum cartographique, qu'il convient de définir.

Nous définissons un **continuum cartographique** comme un ensemble de représentations cartographiques ordonnables, au sein duquel il est possible de passer d'une représentation cartographique à l'autre par une modification élémentaire du style de la représentation cartographique visualisée.

Selon cette approche, un continuum cartographique est donc constitué de plusieurs représentations cartographiques, dont deux extrémités fixées a priori. Ce sont ces extrémités et le nombre de représentations cartographiques intermédiaires qui contraignent et guident la conception des représentations cartographiques intermédiaires formant le continuum. Ainsi, une représentation cartographique intermédiaire est conçue en fonction de sa position dans le continuum et des symbolisations des représentations cartographiques des extrémités du continuum.

De plus, une représentation cartographique intermédiaire contient des objets cartographiques et éléments de symbolisation des deux extrémités du continuum. A ce titre, ce type de représentation cartographique est conçu en tant que représentation cartographique mixte. En termes de conception cartographique, ce modèle de continuum suppose d'être capable d'établir une correspondance entre les symbolisations des extrémités et de disposer de méthodes d'interpolation de ces symbolisations.

L'existence de tels continuums cartographiques permet à l'utilisateur d'interagir avec la représentation qu'il visualise, en choisissant sa représentation parmi un ensemble continu de représentations. Ainsi, ces continuums ont vocation à être intégrés à de nouveaux outils de personnalisation de la visualisation complémentaires de ceux traditionnellement présents dans les géoportails comme la gestion de la transparence ou de l'ordre des couches visualisées. Un continuum cartographique peut ainsi être associé à un curseur dont la valeur définit la position de la représentation cartographique à visualiser. Ce type d'interaction répond directement au besoin identifié dans la partie I de visualisation successive de plusieurs représentations complémentaires, notamment une orthophoto et une carte topographique.

Solution graphique envisagée Le besoin d'interactivité et de navigation entre plusieurs représentations cartographiques diverses nous incite à proposer un ensemble de méthodes d'interpolation entre symbolisations. Cela implique de pouvoir apparier et manipuler continûment les paramètres de ces symbolisations. Ces méthodes seront détaillées au paragraphe 4.2.2.

3.3 3^e principe : synchronisation des symbolisations pour l'homogénéité des représentations intermédiaires

Le troisième principe de notre approche est guidé par une exigence d'homogénéité visuelle qu'il convient de définir.

Une représentation cartographique est **homogène** visuellement par rapport à un critère graphique ou stylistique (comme le réalisme, l'abstraction, ou l'expressivité artistique) lorsque les symbolisations de tous les thèmes cartographiques sont de même niveau du point de vue de cette caractéristique graphique.

Cette définition est une adaptation cartographique du sens commun du concept d'homogénéité qui caractérise ce qui est homogène, c'est-à-dire

"dont la composition et la structure sont les mêmes en tout point ou dont les éléments présentent une grande harmonie entre eux." [Larousse, 2010]

Dans notre approche, la combinaison de méthodes de symbolisation différentes pour les différents thèmes cartographiques devra être contrôlée pour garantir une homogénéité globale de la représentation. Cela suppose d'établir des seuils d'équivalence entre les différents degrés de réalisme ou d'abstraction obtenus par les méthodes d'interpolation de symbolisations, afin de pouvoir faire évoluer simultanément le degré de réalisme et d'abstraction de tous les thèmes de la représentation. C'est cette synchronisation qui nous permettra d'obtenir des représentations cartographiques homogènes et d'assurer une évolution régulière du degré de réalisme et d'abstraction le long d'un continuum cartographique.

A titre d'exemple, la figure 3.14 présente des représentations plus ou moins homogènes visuellement. En effet, certaines présentent uniquement des symbolisations abstraites ou uniquement des symbolisations réalistes (notamment celles de la deuxième colonne) tandis que d'autres présentent un mélange de symbolisations plus ou moins réalistes et abstraites (par exemple celles de la colonne la plus à droite).



FIGURE 3.14 : Exemples de représentations plus ou moins homogènes visuellement.

3.4 Positionnement par rapport au processus de conception cartographique

Dans ce paragraphe, nous positionnons notre approche générale par rapport au processus cartographique issu des travaux en conception cartographique sur lesquels nous nous appuyons. Le processus de conception cartographique a été théorisé et décomposé en vue d'accélérer son automatisation et d'assister un utilisateur novice à le mettre en œuvre, par Ruas [2007], Dominguez *et al.* [2009], Christophe [2009] et Christophe *et al.* [2013]. En figure 3.15 nous présentons une synthèse des processus cartographiques successivement proposés.

Les étapes mises en évidence en violet sur la figure 3.15 sont celles qui seront modifiées par notre proposition de représentation cartographique intermédiaire visant à construire un continuum cartographique :

- L'étape de choix de légende sera revue dans le contexte de la conception d'une représentation mixte impliquant de tenir compte des spécificités des thèmes à symboliser. De plus, cette étape sera également revisitée à l'aune de l'interpolation de symbolisation et de la symbolisation localement adaptative impliquant de contraindre le choix de symbolisation d'un thème à partir de celle d'un ou plusieurs autres thèmes.
- L'étape de production du rendu sera également concernée par notre proposition, puisque celle-ci implique l'utilisation de méthodes de rendu issues de l'informatique graphique telles que la génération de texture ou l'utilisation de différents modes de combinaison de la couleur.

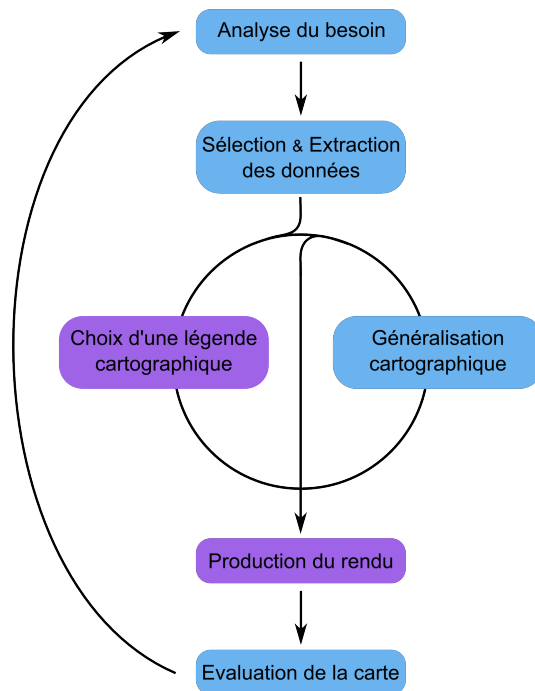


FIGURE 3.15 : Synthèse et modifications prévues du processus cartographique.

Chapitre 4

Méthode de conception d'un continuum cartographique

CONCEVOIR un continuum cartographique implique de disposer d'un ensemble de méthodes de symbolisation afin de prendre en compte les spécificités graphiques des extrémités fixées et de créer des symbolisations intermédiaires entre ces extrémités. De fait, nous nous inspirons des méthodes de conception par l'exemple et par combinaison de méthodes de rendu décrites au paragraphe 2.3. Dans ce chapitre, nous décrivons comment l'orthophotographie peut être utilisée comme source d'inspiration graphique afin de rendre la représentation plus naturelle (Cf. §4.1). Nous proposons un ensemble de méthodes de symbolisation spécifiques à l'objectif de conception d'un continuum (Cf. §4.2). Ces méthodes sont conçues pour être utilisables comme des briques élémentaires de symbolisation au sein d'une méthode globale de conception d'un ensemble de représentations cartographiques intermédiaires formant un continuum cartographique. Nous présentons un test utilisateur que nous avons mis en place afin d'évaluer la perception de l'utilisateur de telles représentations intermédiaires, et permettre le paramétrage des briques de symbolisation (Cf. §4.3).

4.1 Inspiration graphique issue de l'orthophotographie

Afin de pouvoir contrôler le degré de réalisme et d'abstraction des représentations cartographiques intermédiaires, nous souhaitons introduire plus ou moins de caractéristiques abstraites issues de la carte et de caractéristiques naturelles issues de l'orthophotographie. Elles doivent pouvoir être manipulées indépendamment à la manière des paramètres de symbolisation définissant le rendu des données vectorielles. Pour apparier le fond orthophotographique avec une couche vectorielle et interpoler la symbolisation de cette dernière vers l'orthophotographie, il peut être utile d'extraire des caractéristiques graphiques pertinentes décrivant l'orthophotographie. Dans le chapitre 2, plusieurs propriétés faisant de l'orthophotographie une représentation réaliste ont été identifiées. En conséquence, nous souhaitons l'utiliser comme source d'inspiration permettant d'augmenter le réalisme de la carte. Pour cela, nous nous inspirons des méthodes de stylisation par l'exemple (Cf. §2.3) et proposons d'extraire des caractéristiques graphiques pertinentes de l'orthophoto afin de les réinjecter dans le processus cartographique.

Notre analyse de la composition colorée (Cf. §3.1) démontre que les couleurs composant

une orthophotographie sont particulières et significativement différentes de celles des cartes topographiques. C'est cela qui nous invite à considérer les couleurs naturelles contenues dans l'orthophotographie comme la première caractéristique graphique pertinente à extraire.

Par ailleurs, l'utilisation croissante de méthodes de texturation en rendu réaliste nous invite à considérer la texture naturelle de l'orthophotographie comme la deuxième caractéristique graphique pertinente à extraire. La texture naturelle de l'orthophotographie est en effet un élément graphique déterminant dans l'identification des objets géographiques qui y sont représentés. De plus, la texture contient une part importante de l'information absente des cartes topographiques. Cela constitue une raison supplémentaire pour extraire la texture et pouvoir la manipuler indépendamment de la couleur contenue dans l'orthophotographie afin de la réinjecter dans la représentation cartographique.

4.1.1 Extraire la couleur naturelle pour camoufler la carte en s'inspirant de l'orthophotographie

L'orthophotographie représente l'ensemble des objets géographiques visibles depuis le ciel, sans distinction ni classification. Les travaux en télédétection et en traitement d'images proposent des méthodes de segmentation d'image et de détection ou de classification d'objets géographiques. Nous considérons cette étape comme un pré-requis et n'aborderons pas le sujet d'extraction d'information sémantique et géométrique à partir d'une orthophotographie. Pour nous soustraire à cette étape, nous utilisons des données géographiques structurées, renseignant la position, l'emprise et la nature des objets géographiques.

Ainsi, pour guider l'extraction des couleurs naturelles de l'orthophotographie, nous créons dans un premier temps des masques selon nos données cartographiques vectorielles afin de délimiter des zones de couleurs homogènes. Ces masques sont utilisés pour découper l'orthophotographie et en extraire la portion correspondant aux différents thèmes des données cartographiques. Dans un second temps, les couleurs des pixels de ces masques sont classifiées par la même méthode que celle utilisée pour caractériser le contexte graphique des objets dans notre méthode d'adaptation de la symbolisation, l'algorithme des K-Moyennes décrit et comparé à d'autres méthodes de classification par [Christophe et al. \[2013\]](#), et la couleur du groupe contenant le plus de pixels de l'image est conservée. La figure 4.1 présente un exemple d'extraction de la couleur naturelle de la mer.

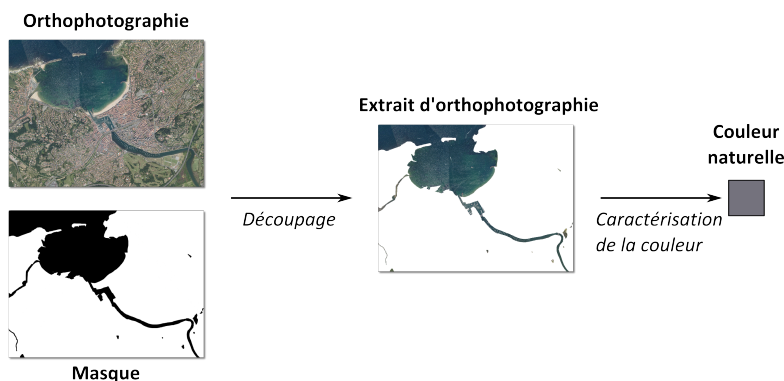


FIGURE 4.1 : Extraction du bleu majoritaire de la mer

Pour rendre la représentation plus naturelle, nous proposons d'appliquer cette méthode à

tous les thèmes de la représentation, puis de réinjecter les couleurs naturelles ainsi obtenues dans la symbolisation des thèmes correspondants. La figure 4.2 présente un exemple d'extraction de couleurs naturelles et de réinjection pour créer une carte plus naturelle.

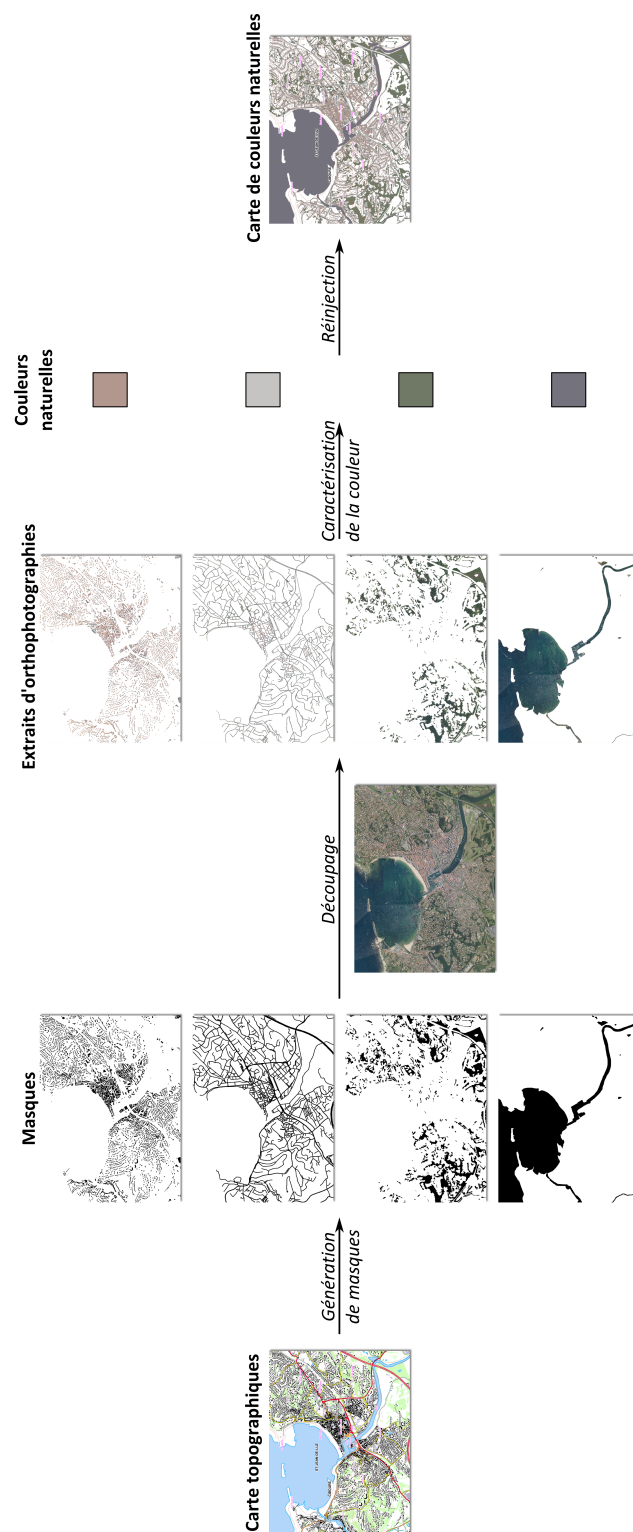


FIGURE 4.2 : Extraction et réinjection des couleurs naturelles de l'orthophotographie.

Cet exemple de réinjection des couleurs naturelles montre que cette caractéristique graphique peut être extraite et utilisée indépendamment de la texture. En conséquence, cette caractéristique pourra être utilisée comme objectif à atteindre dans notre méthode d'interpolation, à la façon d'une étape pivot entre la symbolisation de la carte et celle de l'orthophotographie.



4.1.2 Extraire ou générer une texture pour rendre la carte plus réaliste

La texture constitue une information topographique essentielle de l'orthophotographie, car elle n'apparaît pas dans les représentations cartographiques du territoire. Cette notion graphique est également étudiée et utilisée dans divers domaines visuels (en informatique graphique, en design, en peinture, etc.) ou plastiques (en sculpture, en couture, etc) et définies à ce titre selon plusieurs points de vue. Nous nous intéressons à la notion de texture en cartographie, à l'aune de la covisualisation de données hétérogènes et de l'utilisation de méthodes de rendu permettant de mélanger visuellement plusieurs symbolisations d'un même objet simultanément ou de transmettre une impression visuelle traduisant une information de texture. La théorie de la cartographie définit une variable visuelle, appelée la texture-structure, comme étant la " *combinaison d'éléments graphiques pour couvrir une surface* " [Zanin et Trémolo, 2003, p 167]. Elle est réalisée par la répétition d'une forme géométrique, appelée poncif, selon une structure régulière. Dans le cadre de la covisualisation, nous apportons une nouvelle définition de la texture d'une symbolisation en étendant la variable visuelle texture-structure à la visualisation de différentes symbolisations mélangées et perçues simultanément par l'utilisateur.

La **texture** est définie comme étant le résultat d'un arrangement homogène d'éléments graphiques faisant références aux objets du monde réel sur une zone de la carte. Elle peut être obtenue par une **méthode procédurale** ou bien par l'**injection d'une représentation photographique** de l'objet, ou encore par un mélange des deux grâce à l'**utilisation de la transparence**.

En effet, l'utilisation de la transparence autorise la visualisation de plusieurs représentations d'un même objet simultanément, c'est-à-dire sur l'emprise même de cet objet. Ainsi, différentes symbolisations d'un même objet peuvent être mélangées visuellement et faire apparaître différents types de texture simultanément. En conséquence, nous proposons une typologie de textures perçues en cartographie, dépendant de la combinaison des paramètres des différentes symbolisations superposées d'un même objet géographique. Selon cette typologie, la texture d'une symbolisation peut être (Cf. figure 4.3) :

- **neutre** si la représentation est en aplat.
- **procédurale** si elle est obtenue par une méthode de génération procédurale comme c'est le cas des trames de poncifs issues de la variable visuelle texture-structure et des textures réalistes issues des méthodes de rendu réaliste.
- **naturelle** si elle est obtenue par réinjection d'une représentation photographique sous la forme d'un extrait d'une photographie ou d'une orthophotographie, et symbolisée directement, par transparence ou grâce à un mode de composition de la couleur.
- **mixte**, c'est à dire à la fois procédurale et naturelle, si une texture procédurale et une texture naturelle sont mélangées par transparence.

La logique de cette typologie est donc de décrire si la texture est artificielle et a été générée pour faire penser à la réalité, ou si elle est directement issue d'une prise de vue visant à capturer la réalité. Ces deux sources de symbolisation sont associées à des images schématiques que nous réutilisons dans la suite du mémoire : l'image  permet d'indiquer qu'une symbolisation contient une texture procédurale, et l'image  permet d'indiquer qu'une symbolisation contient une texture naturelle. Ces éléments sont barrés lorsqu'ils ne sont pas contenus dans la symbolisation, et sont utilisés conjointement pour illustrer les différentes catégories de texture de notre typologie en figure 4.3.

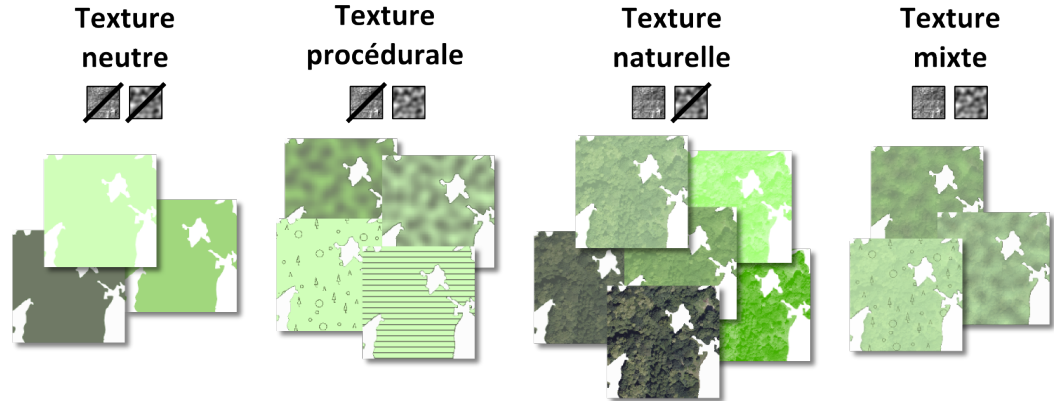


FIGURE 4.3 : Exemples de textures des catégories de notre typologie de texture

Plusieurs paramètres de symbolisation peuvent être utilisés pour produire ces textures. Nous décrivons ici différentes façons de les utiliser pour faire apparaître la texture à partir de différentes caractéristiques de l'orthophotographie.

Texture naturelle par transparence L'utilisation du paramètre de transparence du mode de remplissage d'une couche vectorielle surfacique permet de faire apparaître la texture naturelle d'une orthophotographie. Cependant, cela ne permet pas de manipuler indépendamment cette caractéristique graphique. En effet, l'application de transparence consiste à mélanger les couleurs des deux symbolisations. Nous utilisons pour cela la méthode de simulation de transparence (aussi appelée *alpha blending*) proposée par Porter et Duff [1984] qui permet de déduire la couleur résultante lorsque deux couleurs partiellement transparentes se superposent selon la formule 4.1.

$$r = \frac{r_a \alpha_a + r_b \alpha_b (1 - \alpha_a)}{\alpha_a + \alpha_b (1 - \alpha_a)}, v = \frac{v_a \alpha_a + v_b \alpha_b (1 - \alpha_a)}{\alpha_a + \alpha_b (1 - \alpha_a)}, b = \frac{b_a \alpha_a + b_b \alpha_b (1 - \alpha_a)}{\alpha_a + \alpha_b (1 - \alpha_a)} \quad (4.1)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b (1 - \alpha_a)$$

où r_a, v_a, b_a, α_a sont les coordonnées RVB et la transparence de la première couleur, r_b, v_b, b_b, α_b sont les coordonnées RVB et la transparence de la seconde couleur, et r, v, b, α sont les coordonnées RVB et la transparence de la couleur résultante.

ÉQUATION 4.1 – Simulation de transparence pour le mélange de couleurs, d'après Porter et Duff [1984].

Ainsi, il apparaît que l'utilisation de la transparence seule ne permet pas de manipuler la

caractéristique graphique de texture de l'orthophotographie. En conséquence, nous proposons d'utiliser une alternative à la symbolisation en couleur de l'orthophotographie : la symbolisation en niveaux de gris qui permet de s'abstraire des couleurs naturelles de l'orthophotographie tout en conservant la variabilité visuelle transmise par sa texture. Pour convertir l'orthophotographie en niveaux de gris, chaque pixel est remplacé par un gris correspondant à sa luminance. Pour cela, nous utilisons les paramètres recommandés par l'Union internationale des télécommunications [2002] au sein de la formule de conversion 4.2 :

$$\begin{aligned} cG_R &= 0,2125 \times c_R + 0,7154 \times c_V + 0,0721 \times c_B \\ cG_V &= 0,2125 \times c_R + 0,7154 \times c_V + 0,0721 \times c_B \\ cG_B &= 0,2125 \times c_R + 0,7154 \times c_V + 0,0721 \times c_B \end{aligned} \quad (4.2)$$

où c_R , c_V , c_B sont les coordonnées colorimétriques du pixel d'origine dans le système colorimétrique RVB, et cG_R , cG_V , cG_B sont les coordonnées colorimétriques du pixel en niveaux de gris dans le système colorimétriques RVB.

ÉQUATION 4.2 – Conversion en niveaux de gris d'une image en couleur RVB.

La figure 4.4 présente la version en niveaux de gris obtenue par conversion des couleurs de l'orthophotographie selon la formule 4.2, ainsi que les représentations cartographiques obtenues par superposition par transparence de ces deux symbolisations d'une même orthophotographie.

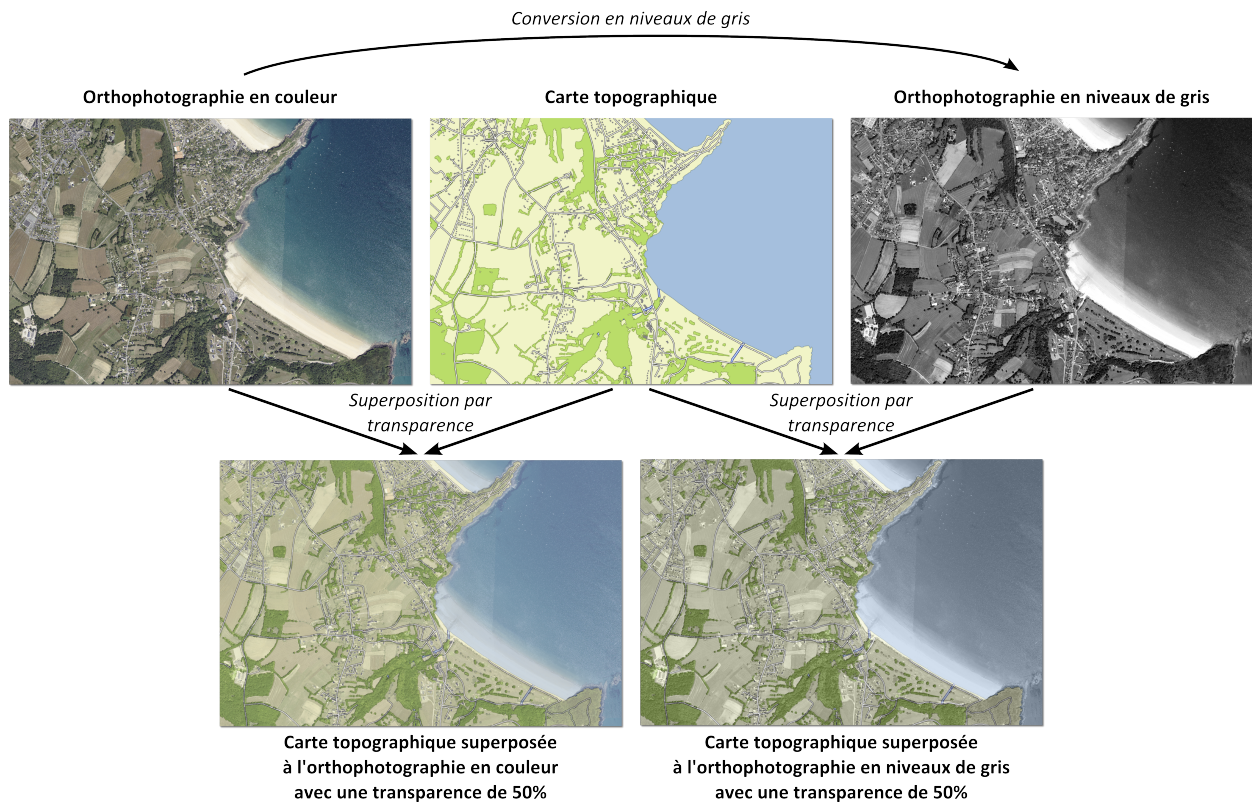


FIGURE 4.4 : Effet de la transparence sur la couleur et utilisation indépendante des caractéristiques de couleur et de texture transparente.

La comparaison des deux représentations obtenues par superposition par transparence de

la figure 4.4 permet d'observer le mélange des couleurs des aplats de la carte avec ceux de l'orthophotographie dans l'image en bas à gauche. En effet, les différentes zones de la carte présentent une plus grande variabilité colorimétrique. L'image en bas à droite quant à elle, illustre un exemple de réinjection de la texture de l'orthophotographie indépendamment de la couleur. L'utilisation d'une orthophotographie en niveaux de gris modifie localement la luminosité des couleurs de la carte superposée par transparence. Cela apporte une information sur la texture naturelle des objets capturée par l'orthophotographie, sans modifier la teinte des couleurs de la carte. Cependant, cela produit également une image globalement plus sombre du fait de la sombreur générale de l'orthophotographie initiale, transmise par sa version en niveaux de gris.

Grâce à la conversion de l'orthophotographie en noir et blanc, nous disposons d'une première méthode d'extraction de la caractéristique graphique de texture que nous pouvons réinjecter dans le processus cartographique indépendamment de la couleur. Par exemple, nous sommes ainsi capable de créer une représentation cartographique aux caractéristiques naturelles en injectant d'une part les couleurs naturelles extraites de l'orthophotographie (Cf. paragraphe précédent) dans la symbolisation des données vecteur cartographiques (de la même façon que pour la figure 4.2) et d'autre part la texture naturelle de l'orthophotographie en introduisant sa symbolisation en niveaux de gris (Cf. figure 4.5).

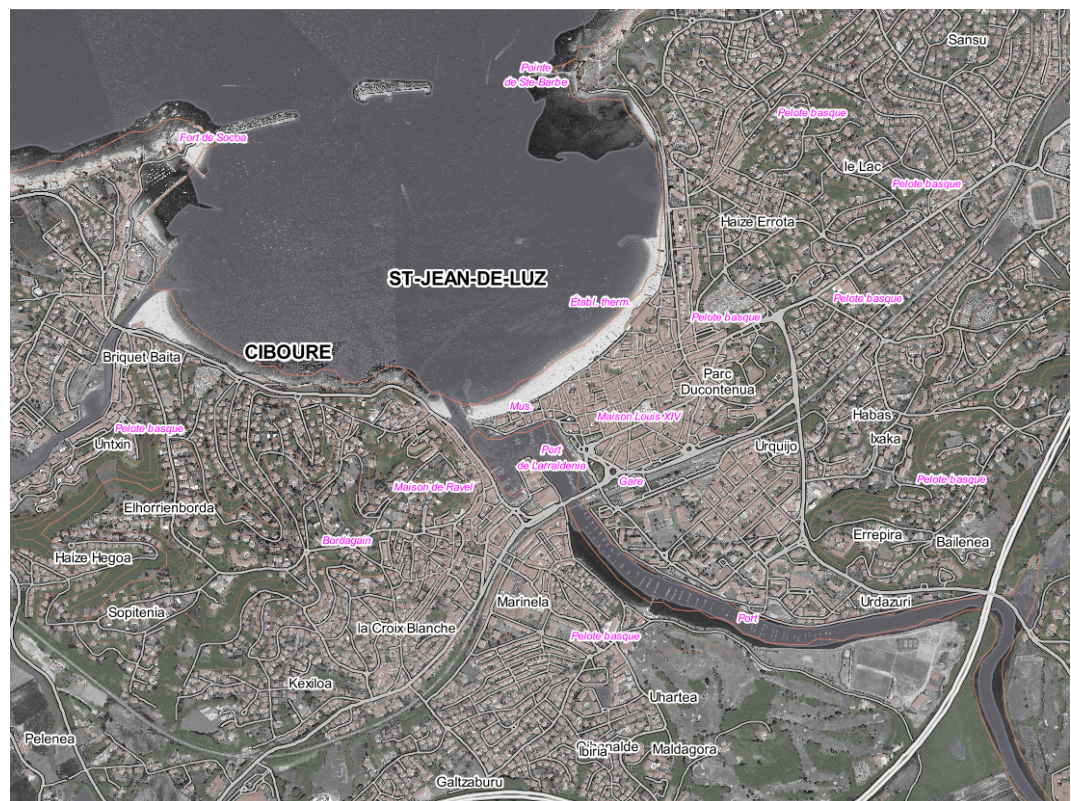


FIGURE 4.5 : Représentation cartographique issue de la réinjection des caractéristiques graphiques naturelles de couleur et de texture par transparence.

Texture naturelle par composition de couleurs Porter et Duff [1984] proposent également différents modes de combinaison de la couleur décrivant des formes de transparence sophistiquées utilisant la décomposition de la couleur dans les différents systèmes de codage de la couleur. Ces

modes de combinaison de couleurs sont appelés *Compositing modes* et décrits dans la norme du W3C *Compositing and Blending* [Cabanier et Andronikos, 2015]. Ils permettent de mélanger les couleurs de deux images superposées. La figure 4.6 présente les exemples de mélanges colorés obtenus par utilisation de ces différents modes de combinaison de couleurs.

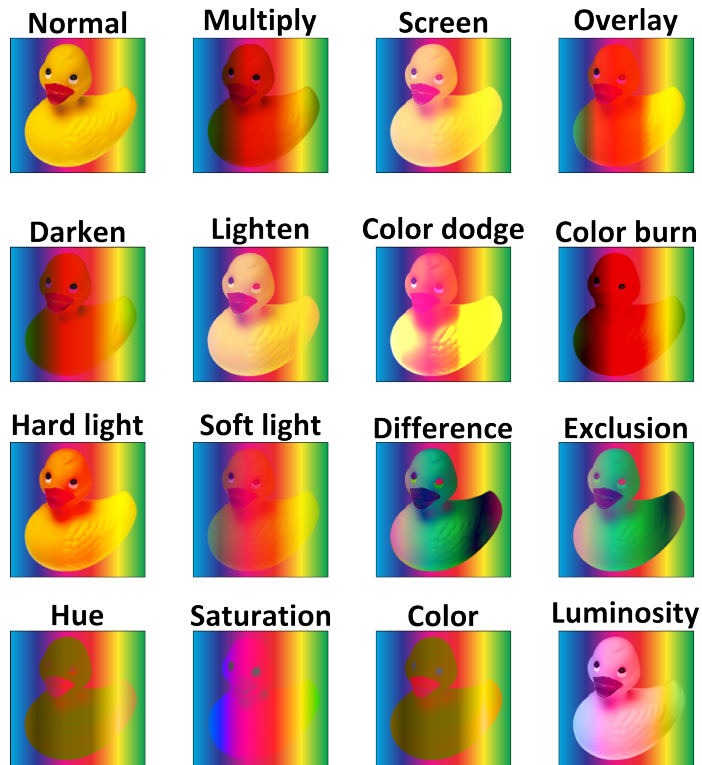


FIGURE 4.6 : Les différents modes de mélange coloré décrit dans la norme *Compositing and Blending* [Cabanier et Andronikos, 2015].

Ces modes de combinaison de la couleur sont particulièrement intéressants en vue d'une injection des caractéristiques graphiques du fond orthophotographique dans le processus de conception cartographique. En effet, certains d'entre eux permettent de traiter indépendamment et différemment différentes composantes de la couleur. Dans notre cas, nous nous intéressons particulièrement au mode overlay visant à refléter la clarté ou la sombreur de l'image se trouvant en dessous dans la superposition d'image. Ainsi, l'utilisation du mode overlay est une seconde façon de manipuler indépendamment la caractéristique de texture naturelle de l'orthophotographie. Pour assurer une manipulation totalement indépendante de la texture par ce mode de combinaison des couleurs, celui-ci peut également être appliqué à une orthophotographie convertie en niveaux de gris. La figure 4.7 présente l'application du mode overlay sur une carte superposée par overlay à une orthophotographie en couleur et une orthophotographie en niveaux de gris. Ces représentations montrent que le mode de combinaison overlay permet de réinjecter indépendamment la caractéristique de texture naturelle issue de l'orthophotographie. De plus, étant donné qu'elle n'impacte que la luminosité, cette méthode produit une image globalement aussi lumineuse que la carte initiale. Le résultat est donc beaucoup moins terne que celui obtenu avec une simple transparence (Cf. 4.4).

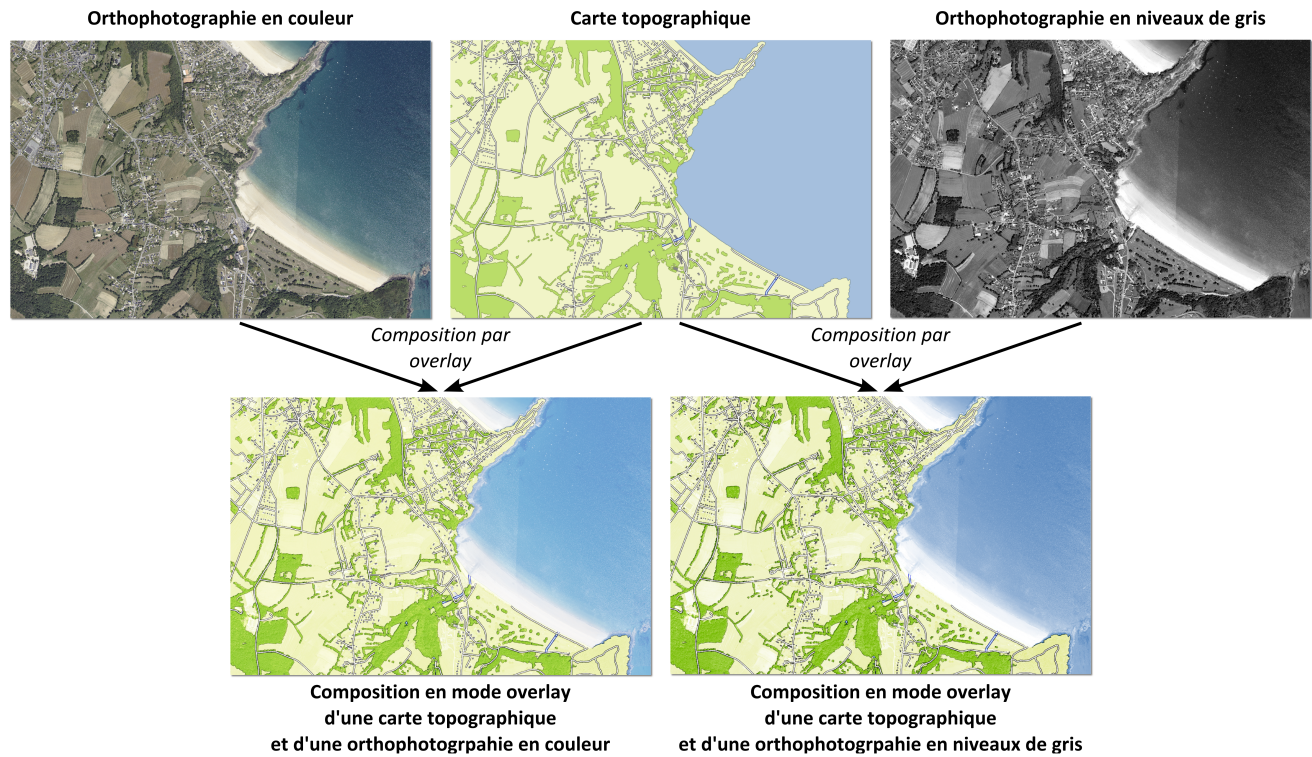


FIGURE 4.7 : Combinaison d'une carte topographique avec une orthophotographie en couleur et en niveaux de gris par le mode overlay.

Texture procédurale réaliste Dans ce paragraphe, nous présentons un exemple d'utilisation de caractéristiques graphiques naturelles pour générer une texture par une méthode procédurale. Nous utilisons la méthode de génération de texture proposée par [Perlin \[1985\]](#). Cette méthode consiste à générer une texture en deux dimensions à partir d'une fonction de bruit. Elle présente plusieurs propriétés qui nous invitent à l'utiliser pour texturer certains objets géographiques : elle est reproductible, continue dans l'espace, et surtout elle permet de générer une texture d'apparence aléatoire. Cet effet visuel reproduit le caractère aléatoire de la texture des objets du monde réel. C'est pourquoi l'utilisation d'une texture de Perlin, comme bien d'autres types de texture procédurales, permet d'augmenter le réalisme de la symbolisation. Le calcul du bruit de Perlin permet donc de générer une image en niveaux de gris comme celle de gauche en figure 4.8. Ensuite, il est possible d'associer un dégradé de couleur à ce bruit en noir et blanc afin d'obtenir une texture colorée. La figure 4.8 présente un exemple d'association d'un dégradé allant du jaune au vert à une texture de Perlin en niveaux de gris pour obtenir une texture de Perlin en jaune et vert.

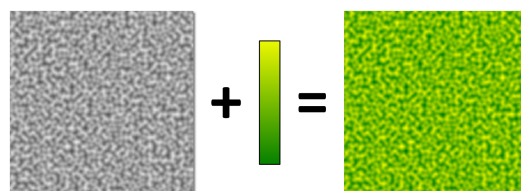


FIGURE 4.8 : Exemple de coloration de la texture de Perlin

En tant que texture procédurale, le rendu final de la texture de Perlin peut être contrôlé par un ensemble de paramètres : il est ainsi possible de faire varier sa **quantité** (en modifiant l'amplitude de la fonction de bruit), son **étirement** (en déformant la texture selon une dimension), son **angle** (si elle présente un étirement, celui-ci peut être réalisé dans une direction donnée par cet angle), sa **turbulence** (en définissant le nombre de fréquences du bruit utilisé pour générer la texture), et enfin les **couleurs** utilisées pour colorer la texture. Ces paramètres peuvent ainsi être utilisés à la manière des variables visuelles classiques de la cartographie. La variation de ces paramètres est illustrée par les échantillons de textures de la figure 4.9.

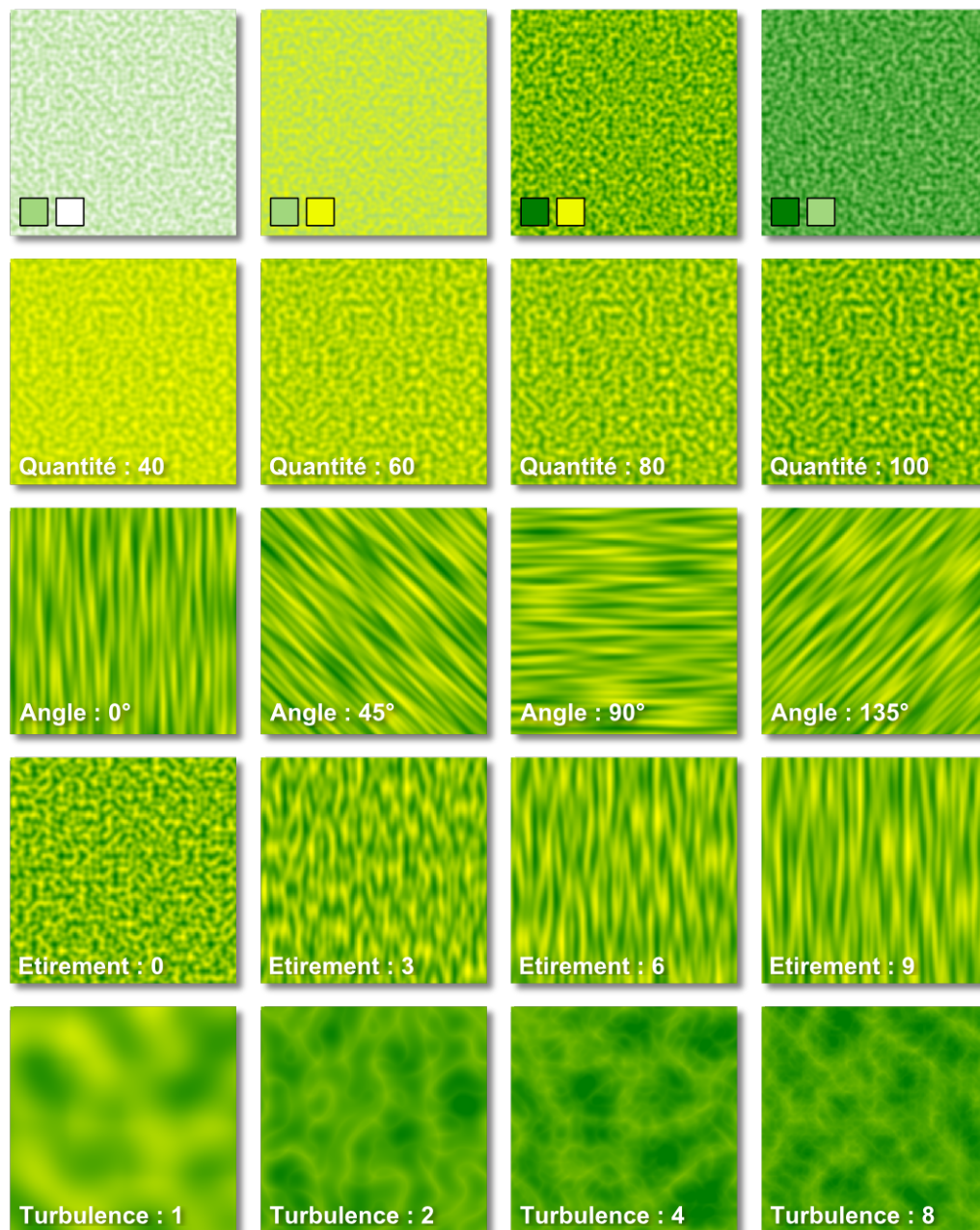


FIGURE 4.9 : Variation des paramètres de la texture de Perlin, à la manière des variables visuelles.

La texture de Perlin peut donc être utilisée pour introduire une impression visuelle similaire à la caractéristique graphique de texture de l'orthophotographie. Dans le cadre d'un séjour de mobilité dans le laboratoire de Bernhard Jenny, nous avons exploré l'utilisation de cette méthode de texture pour créer des cartes pseudo-naturelles, c'est-à-dire alliant l'abstraction cartographique et l'apparence naturelle du territoire [Jenny *et al.*, 2012]. La figure 4.10 présente une représentation du Mont Hood en Oregon, obtenue en appliquant différentes textures de Perlin, notamment une texture blanche et bleu pour la neige du glacier, et une texture de plusieurs verts différents pour représenter la végétation. De plus, le dégradé de couleurs utilisé pour colorer la texture de la végétation évolue en fonction de l'altitude afin de renforcer la perception du relief. Cette technique sera détaillée dans le paragraphe suivant sur l'interpolation des symbolisations.



FIGURE 4.10 : Exemple d'utilisation de la texture de Perlin pour créer une carte pseudo réaliste.

Enfin, pour augmenter encore le réalisme de la texture, celle-ci peut être construite à partir de la couleur naturelle extraite de l'orthophotographie comme c'est le cas de la texture de la figure 4.11. L'application d'une telle texture permet de réinjecter les deux caractéristiques graphiques de l'orthophotographie que sont sa couleur naturelle et une impression de sa texture naturelle. De plus, la texture de la figure 4.11 a également été générée à partir de la couleur de la végétation dans une carte topographique. Il apparaît clairement que la représentation finale de la végétation de la figure 4.11 présente un mélange de caractéristiques graphiques issues d'une carte et d'une orthophotographie. Elle pourra donc être utilisée comme une symbolisation pivot entre la symbolisation abstraite en aplat vert clair de la carte et la symbolisation naturelle de l'orthophotographie en couleur.

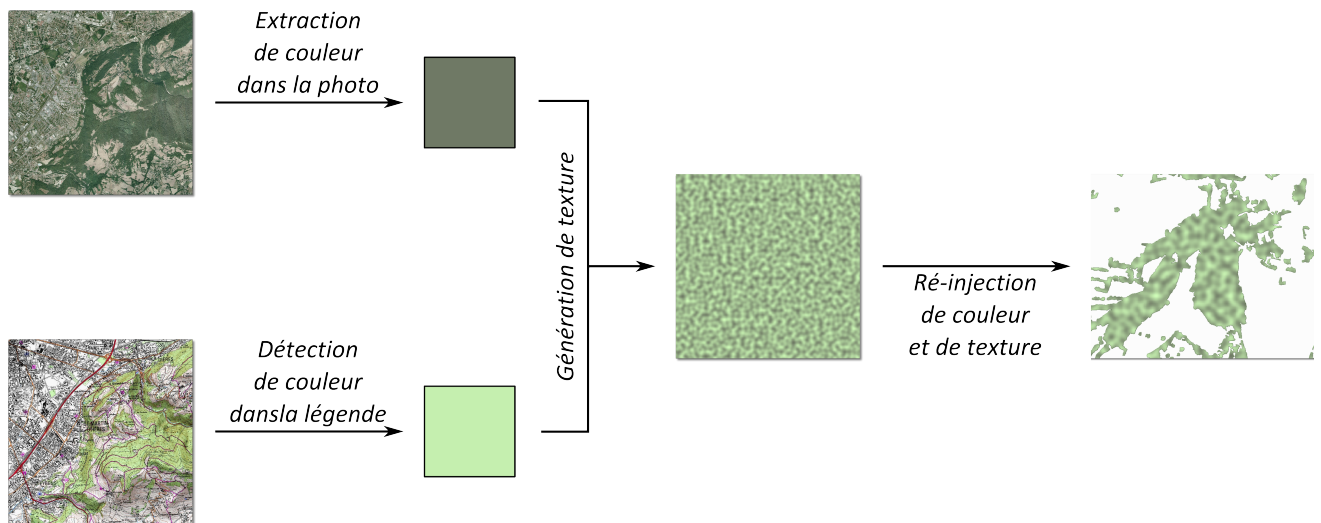


FIGURE 4.11 : Réinjection des caractéristiques graphiques des extrémités pour créer une texture procédurale pivot.

Nous avons distingué deux paramètres graphiques clés que sont la couleur et la texture naturelle de l'orthophotographie. Cela nous permet de les utiliser dans des méthodes spécifiques de symbolisation.

4.2 Briques élémentaires de symbolisation

Dans ce paragraphe, nous proposons trois types méthodes de symbolisation cartographique. Le premier type de méthode vise à permettre la covisualisation par superposition de données vecteurs sur tout type de fond, cartographique ou orthophotographique : nous proposons **une brique d'adaptation locale de la symbolisation des vecteurs** en fonction du fond sur lesquels ils sont superposés (Cf. §4.2.2). Le second type de méthode vise à permettre la création de transitions graphiques pour un thème entre deux symbolisations, celles des extrémités du continuum en construction : nous proposons **plusieurs briques d'interpolation de symbolisation** permettant de créer chacune un chemin graphique, le long duquel un paramètre de symbolisation évolue (Cf. §4.2.1). Le troisième type de méthode indique comment affecter les briques de symbolisation, les combiner et les coordonner entre elles (Cf. §4.2.3) pour concevoir des représentations intermédiaires homogènes. L'objet de ce paragraphe est de détailler le fonctionnement de ces méthodes de symbolisation ainsi que les possibilités de paramétrisation que le cartographe pourra utiliser comme leviers graphiques pour construire un continuum cartographique. Les trois types de méthode ont vocation à répondre aux trois principes détaillés au chapitre 3 et permettent d'assurer la lisibilité, la continuité et l'homogénéité graphique des représentations intermédiaires.

4.2.1 Adaptation locale des symbolisations pour la préservation de la lisibilité

Afin de prendre en compte les spécificités des distributions colorées des fonds orthophotographiques (Cf. §3.1), nous proposons une méthode d'adaptation de la symbolisation des données

vectérielles superposées à ce type de fond. Notre objectif est d'assurer la lisibilité de ces données vectorielles. Pour cela, notre approche consiste à prendre en compte localement l'impact graphique du fond autour de chaque objet cartographique pour définir sa symbolisation. Notre proposition ne modifie pas la symbolisation du fond orthophotographique lui-même (en couleur ou en noir et blanc) et n'altère donc pas l'information contenue dans l'orthophoto. En revanche, la symbolisation des objets cartographiques à représenter est adaptée localement, en vue de garantir leur lisibilité par rapport au fond, sans augmenter leur saillance. Ainsi, notre méthode présente l'avantage de permettre de définir une symbolisation adaptée quel que soit le fond utilisé, en fonction de l'impact graphique de ce dernier.

A titre d'exemple, notre méthode vise à pallier au manque de lisibilité des routes représentées par un simple trait (Cf. figure 4.12 en haut) : celles-ci sont localement peu visibles comme les routes en blanc sur un sol très clair, ou les routes en noir traversant une forêt. De plus, notre méthode vise également à éviter la saillance excessive des routes représentées par un trait coloré et un contour très contrasté (Cf. figure 4.12 en bas), symbolisation efficace mais très saillante et visant un autre objectif de visualisation : faire ressortir le réseau routier.

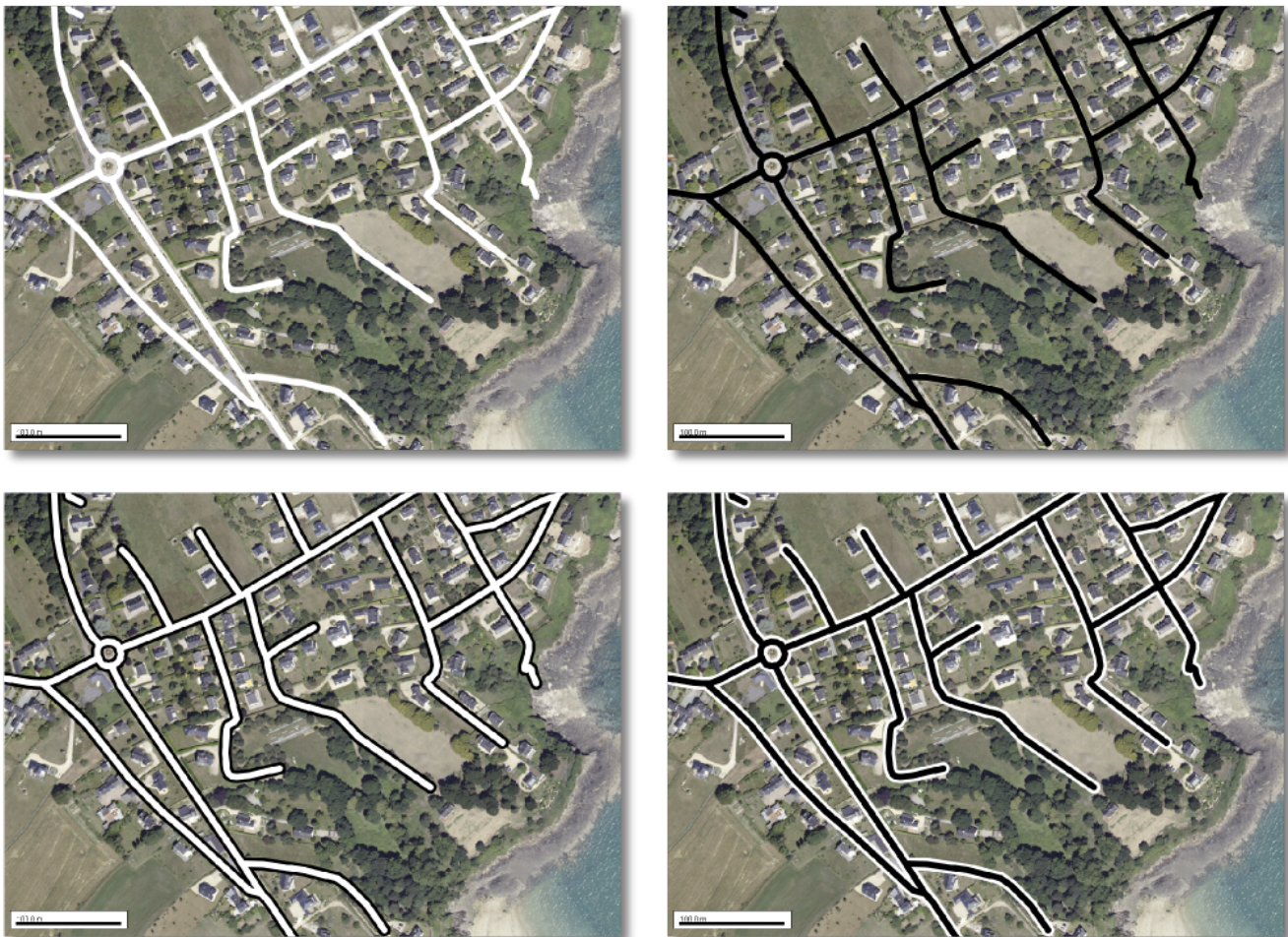


FIGURE 4.12 : Exemples de symbolisations de routes sur fond orthophotographique.

Plusieurs défis sont levés par notre proposition d'adaptation locale de la symbolisation des données vecteurs :

- Le contexte graphique de chaque objet cartographique à symboliser doit être défini, délimité, et sa distribution colorée doit être caractérisée.
- La symbolisation de la couche traitée doit être définie en fonction de la symbolisation d'une ou de plusieurs autres couches (celles formant le contexte graphique, notamment le fond de carte ou le fond orthophotographique).
- La symbolisation sera adaptée (au contexte graphique de l'objet), et donc potentiellement différente pour les objets d'un même thème cartographique.

Méthodologie : Revisiter le principe de l'alourdi Notre méthode de symbolisation localement adaptative a pour objectif d'assurer la lisibilité des objets au regard de leur contexte graphique. Pour cela, nous revisitons le principe de l'alourdi cartographique pour mettre en valeur certains objets cartographiques. Le principe de l'alourdi cartographique est utilisé dans les cartes topographiques afin de garantir la lisibilité des toponymes. Il consiste à appliquer un filtre coloré sélectif qui supprime toutes les couches noires autour des toponymes. Ainsi, les contours des routes, les bâtiments ou encore les chemins sont découpés pour faciliter la lisibilité des toponymes de couleur noire, mais pas les autres éléments de symbolisation colorés comme la végétation, l'hydrographie ou encore les sentiers de randonnée. La figure 4.13 illustre ce principe en présentant plusieurs toponymes dans des contextes graphiques colorés variés.



FIGURE 4.13 : Alourdis cartographiques

Nous nous inspirons de ce principe dans notre méthode car nous prenons en compte le contexte graphique et sa couleur pour définir la symbolisation des objets à représenter. En conséquence, notre méthode se décompose en plusieurs étapes successives dont la figure 4.14 présente l'enchaînement : elles consistent à identifier le contexte graphique pour chaque objet et à le caractériser colorimétriquement en vue de déterminer une couleur contrastée à appliquer au contour de l'objet à représenter.

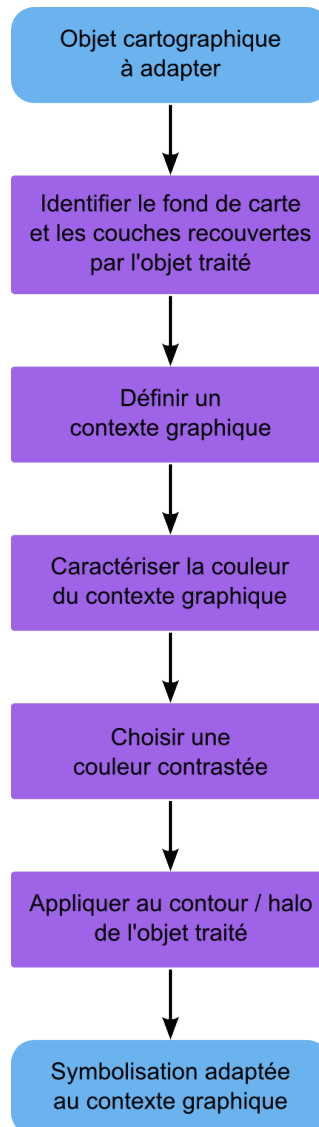


FIGURE 4.14 : Méthode de symbolisation localement adaptative

4.2.1.1 Composition et délimitation du contexte graphique

L'objectif principal de notre méthode est de prendre en compte le contexte graphique, c'est-à-dire le voisinage de l'objet à mettre en valeur. Deux éléments sont à analyser : les thèmes cartographiques en présence, et la délimitation du contexte graphique. Tout d'abord, nous considérons toutes les couches situées sous la couche des objets à traiter. Selon où se situe la représentation cartographique intermédiaire au sein du continuum, l'impact visuel provoqué par cet ensemble de couches peut être très différent. Ensuite, pour délimiter le contexte graphique, nous préconisons d'utiliser un buffer autour de chaque objet pour délimiter l'emprise du contexte graphique. La taille de ce buffer a été déterminée empiriquement par essais successifs, et fixée au double de l'épaisseur de l'objet en question. De plus, l'emprise de l'objet symbolisé a été retirée de l'emprise du contexte graphique, en prenant en compte l'épaisseur du contour de la symbolisation de cet objet, afin de ne pas prendre en compte la partie du fond occultée par l'objet lui-même. Le contexte graphique est donc une sorte de couronne autour de l'objet à représenter, d'une forme

suivant celle de l'objet. La figure 4.15 présente des exemples de contextes graphiques extraits à partir du réseau routier. Sur cette figure, le réseau routier filaire est représenté, au regard du réseau routier symbolisé pour illustrer l'importance de la prise en compte de l'épaisseur de symbolisation. Cette épaisseur est prise en compte pour déterminer les emprises des contextes graphiques qui sont toutes représentées simultanément sur la figure 4.15 au regard du réseau routier puis de l'orthophotographie. Ces emprises ne contiennent pas la partie du fond qui est occultée par les objets symbolisés. Enfin, la figure 4.15 présente également les contextes graphiques extraits pour l'ensemble du réseau routier. Ces contextes graphiques sont représentés autour des tronçons routiers symbolisés pour lesquelles la symbolisation est à adapter, et autour du réseau filaire afin d'illustrer une nouvelle fois la prise en compte de l'occultation du fond par les objets symbolisés.

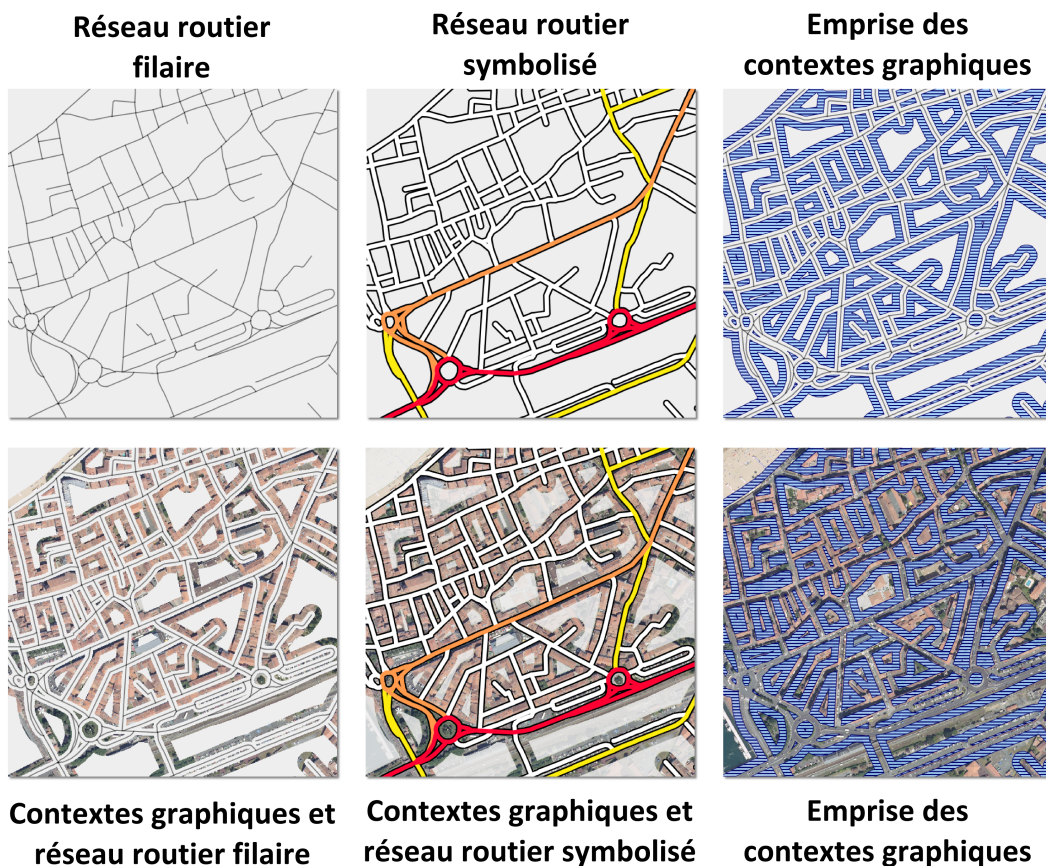


FIGURE 4.15 : Exemples de contextes graphiques extraits pour un ensemble de tronçons routiers

4.2.1.2 Caractérisation de la couleur du contexte graphique

Pour caractériser chaque contexte graphique, nous déterminons la couleur majoritaire présente dans le contexte graphique. Pour cela, les couleurs des pixels du contexte graphique sont classifiées par l'algorithme des K-Moyennes décrit et comparé à d'autres méthodes de classification dans [Christophe et al. \[2013\]](#). La couleur du groupe issu de la classification contenant le plus de pixels de l'image est conservée. Cette méthode assure de choisir une couleur qui existe au sein du contexte graphique, ce qui ne serait pas systématiquement le cas en calculant la couleur moyenne des pixels du contexte graphique par exemple.

4.2.1.3 Choix d'une couleur contrastée par rapport au contexte graphique

Pour symboliser l'objet à mettre en valeur, nous déterminons une couleur qui est à la fois contrastée avec le contexte graphique de l'objet, et plutôt similaire à celles des autres objets du thème cartographique en cours de traitement. L'objet à mettre en valeur sera donc symbolisé avec un gris coloré ayant une teinte opposée à la couleur du contexte graphique, que nous appelons **gris complémentaire**. La figure 4.16 présente l'enchaînement des étapes nécessaires à la détermination d'un gris complémentaire.

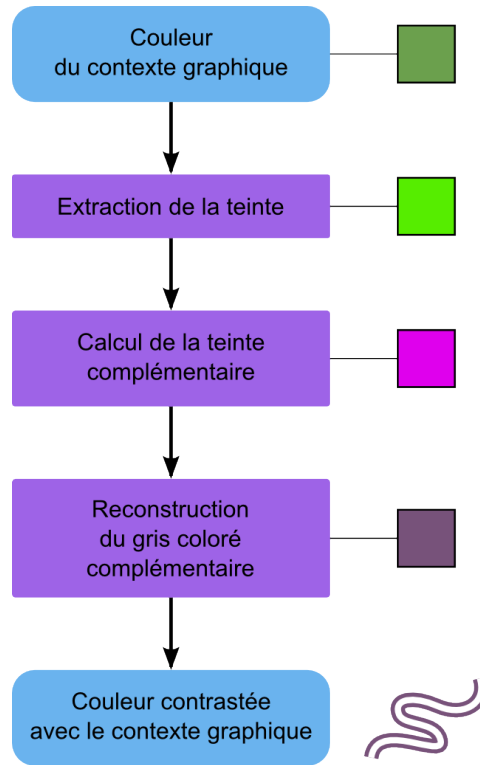


FIGURE 4.16 : Détermination du gris complémentaire d'une couleur

Les calculs colorimétriques permettant de déterminer le gris complémentaire sont réalisés dans le système colorimétrique TSL permettant de manipuler indépendamment la teinte, la saturation et la luminosité qui sont les trois axes de représentation de la couleur dans ce système. Ainsi, la teinte de la couleur du contexte graphique sera sa première coordonnée après conversion dans le système TSL par la formule 4.3.

$$teinte = \begin{cases} 60 \cdot \frac{G - B}{C} & \text{si } M = R \\ 120 + 60 \cdot \frac{B - R}{C} & \text{si } M = V \\ 240 + 60 \cdot \frac{R - G}{C} & \text{si } M = B \end{cases} \quad (4.3)$$

$$saturation = 100 \cdot \frac{C}{M}$$

$$luminosite = 100 \cdot \frac{M}{255}$$

où R , G , B sont les coordonnées RVB de la couleur à convertir, M est le maximum des com-

posantes RVB, m est le minimum des composantes RVB, $C = M - m$, la teinte est exprimée en degrés et la saturation et la luminosité sont comprises entre 0 et 100.

ÉQUATION 4.3 – Conversion colorimétrique du système RVB vers le système TSL.

La teinte complémentaire est ensuite calculée par inversion de la coordonnée de teinte dans ce système colorimétrique, selon la formule 4.4 :

$$teinte_{complémentaire} \equiv teinte + 180 \pmod{360} \quad (4.4)$$

ÉQUATION 4.4 – Calcul de la teinte complémentaire dans le système colorimétrique TSL.

Enfin, le gris coloré est construit à partir de la teinte complémentaire et de coordonnées de saturation et de luminosité fixées. La saturation du gris complémentaire sera faible (sinon la couleur serait vive, ce ne serait pas un gris), et la luminosité sera moyenne pour obtenir un gris ni trop foncé ni trop clair.

La figure 4.17 présente une frise colorée très vive à laquelle est accolée successivement une frise colorée de même vivacité mais avec des teintes complémentaires, puis une frise de couleurs grisées de teinte complémentaire et de saturation moyenne (égale à 60), puis une frise de gris colorés de teinte complémentaire et de saturation faible (égale à 20) et enfin une frise grise unie de saturation nulle.

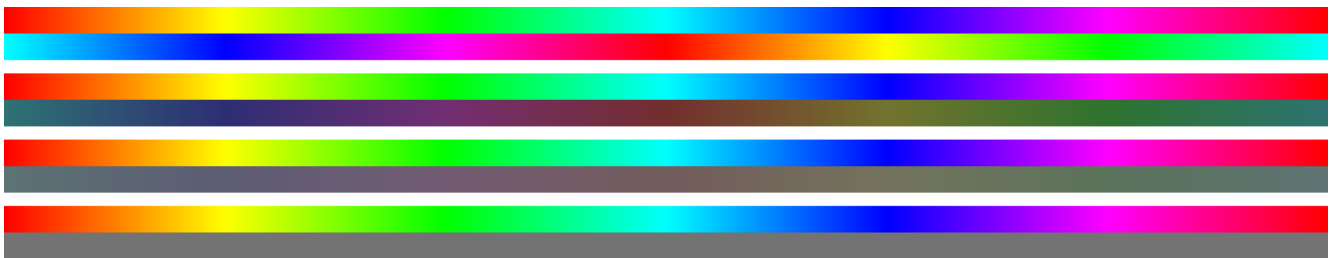


FIGURE 4.17 : Couleurs et gris complémentaires plus ou moins saturés

Dans notre méthode d'adaptation de la symbolisation, nous utilisons des gris colorés de saturation 20% et une luminosité de 40%. D'une part, ces paramètres correspondent aux valeurs moyennes observées sur les orthophotographies du panel analysé au paragraphe 3.1 ; cela permet une intégration visuelle de cette symbolisation au sein d'un fond orthophotographique. D'autre part, comme on peut l'observer sur la troisième frise de la figure 4.17, avec ces paramètres de saturation et de luminosité, les variations de teinte sont perceptibles mais pas nettement visibles. Ainsi, l'adaptation locale permettra de démarquer visuellement les objets vis-à-vis du contexte graphique qui les entoure, mais ne provoquera pas de grande variabilité de couleurs qui aurait pu perturber la compréhension de l'utilisateur. En effet, il est légitime de penser que si la variation de couleurs était trop importante d'un objet à un autre, ceux-ci ne seraient plus associés à un thème cartographique.

4.2.1.4 Symbolisation de l'objet à mettre en valeur

Une fois le gris complémentaire calculé, il est appliqué au contour des objets à mettre en valeur. En effet, l'objectif étant de démarquer visuellement ces objets, il suffit d'appliquer le gris complémentaire au contour des objets pour les détacher de leur contexte graphique, dans l'esprit de l'alourdi cartographique. Cela permet de limiter la gêne visuelle et cognitive qu'aurait provoqué l'utilisation de couleurs différentes sur des objets cartographiques d'un même thème : d'une part, les gris complémentaires sont relativement similaires car ils partagent des coordonnées de saturation et de luminosité identiques, d'autre part, ces couleurs différentes sont appliquées sur de petites surfaces de la carte. La figure 4.18 présente le résultat de cette application sur une représentation avec un fond orthophotographique.



FIGURE 4.18 : Représentation localement adaptative des contours du réseau routier par couleur unie pour chaque tronçon de route.

Afin de conserver une continuité visuelle de la représentation le long du réseau routier, nous avons également mis en œuvre notre méthode de symbolisation en générant les contextes graphiques autour des extrémités des tronçons de route, afin de déterminer un gris complémentaire pour chaque extrémité de tronçon et de pouvoir symboliser les contours par un dégradé coloré entre ces deux couleurs. La figure 4.19 présente le résultat de cette symbolisation par dégradés colorés réalisés par interpolation dans le système CIELab, comme dans notre méthode d'interpolation de couleur (Cf. §4.2.2).



FIGURE 4.19 : Représentation localement adaptative des contours du réseau routier en dégradés colorés sur chaque tronçon de route.

La différence entre les figures 4.18 et 4.19 est plutôt subtile, voir même difficilement perceptible. Cependant, dans un fond présentant des couleurs très variées, l'utilisation d'une symbolisation en dégradé serait un réel gage de continuité visuelle et ne créerait pas de coupure visuelle fictive entre tronçons de routes.

4.2.1.5 Comparaison et analyse critique des symbolisations résultantes

Dans ce paragraphe, nous comparons les symbolisations obtenues par l'application de notre méthode d'adaptation de symbolisation (appliquée en aplat ou en dégradé sur les contours du réseau routier), aux symbolisations obtenues par des méthodes de symbolisation classique (sans contour, avec un contour gris uni, avec un contour noir). La figure 4.20 présente un exemple de chacune de ces symbolisations.

En terme de lisibilité, notre méthode est plus efficace si on compare nos résultats à une représentation sans contour qui n'est pas toujours bien visible (comme dans la zone gauche de nos exemples, autour du rond-point) ou si on compare nos résultats à une représentation avec un contour noir qui est trop saillant et gêne la lecture du reste de la représentation. Cependant, si l'on compare nos résultats à une représentation avec un contour gris, la différence perceptuelle n'est pas visible directement. Nous avons la conviction que c'est un des atouts de notre méthode de symbolisation, car elle assure une meilleure lisibilité par l'adaptation locale au contexte graphique mais son effet n'est pas visible pour l'observateur, il est uniquement perceptible. Nous rejoignons dans ce sens la proposition de symbolisation de [Raposo et Brewer \[2013\]](#) visant à assurer la lisibilité grâce à un moyen graphique non visible afin de ne pas perturber la lecture de l'utilisateur.

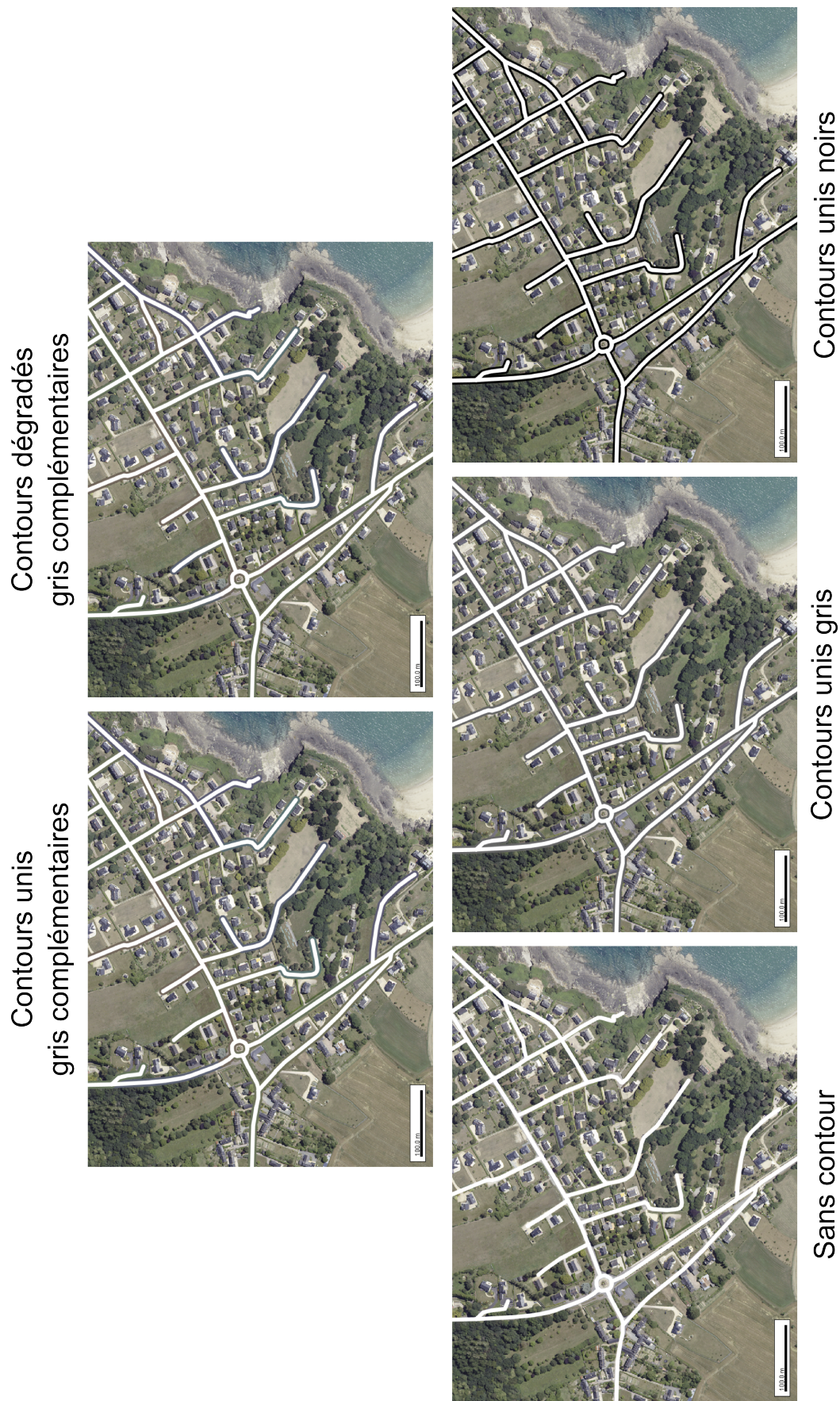


FIGURE 4.20 : Comparaison des symbolisations localement adaptatives et des symbolisations traditionnelles

Cette méthode a l'avantage d'être applicable quel que soit le fond de carte puisqu'elle détermine la symbolisation en fonction de celui-ci. Elle est donc générique de ce point de vue et son principe pourrait être appliqué dans d'autres contextes de visualisation. C'est là un avantage supplémentaire par rapport aux propositions de [Raposo et Brewer \[2013\]](#) qui sont spécifiques aux fonds étudiés, une carte topographique et une orthophotographie.

Enfin, l'application de notre méthode aux contours des objets, en plus de réduire la variabilité de couleur qu'aurait entraîné son application à de grands aplats colorés, ne constitue pas un frein à l'application des principes de la sémiologie graphique pour transmettre une information qualitative ou quantitative à propos des tronçons de routes. En effet, il est toujours possible de refléter une hiérarchie administrative ou tout autre information qualitative par l'utilisation de la variable visuelle couleur dans l'intérieur des routes ou une information quantitative par l'utilisation de la variable visuelle de taille en faisant varier l'épaisseur des tronçons de routes.

4.2.2 Interpolation de symbolisations pour la création de continuums

Notre méthode d'interpolation de symbolisations vise à symboliser un thème de façon continue et progressive au sein d'un continuum. Grâce à cette méthode, le cartographe est en capacité de créer un chemin graphique entre deux symbolisations définies pour un même thème cartographique. La figure 4.21 présente une décomposition séquentielle globale de la méthode de symbolisation proposée dont les étapes sont détaillées dans les paragraphes suivants.

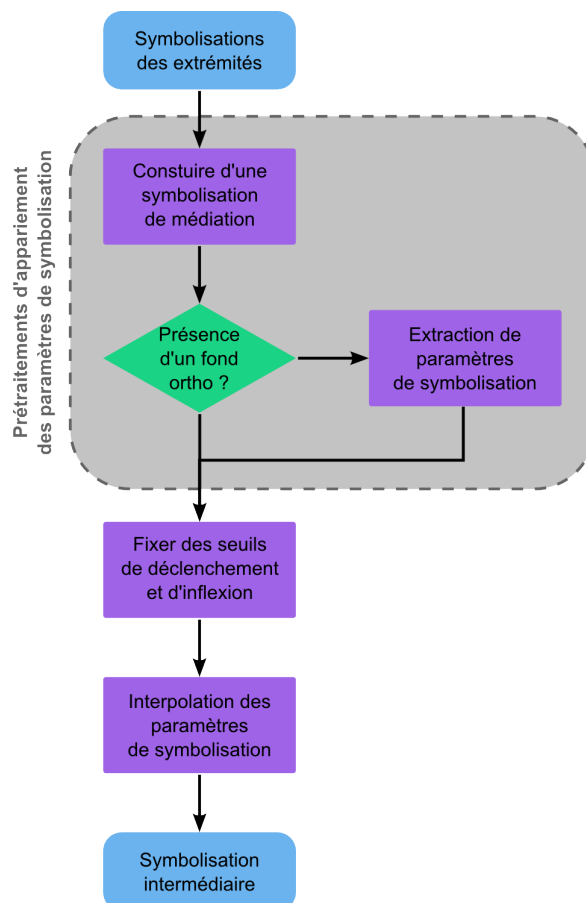


FIGURE 4.21 : Décomposition séquentielle de la méthode d'interpolation de symbolisations.

Tout comme pour notre proposition d'adaptation locale de la symbolisation, deux défis doivent être relevés par notre proposition d'interpolation de symbolisations :

- Les spécificités des symbolisations des extrémités du continuum guideront le choix de la méthode d'interpolation de symbolisation. Notamment, l'utilisation d'un fond orthophotographique comme extrémité nous incitera à explorer l'utilisation de méthode d'extraction de caractéristiques graphiques pertinentes, et de génération de textures procédurales.
- La symbolisation de la couche traitée sera également définie en fonction de la symbolisation des extrémités du continuum.

Pré-requis Même si elles prennent en compte d'autres thèmes de la représentation cartographique en construction, nos méthodes d'interpolation de symbolisation s'appliquent à un seul thème à la fois. Ainsi, nous considérons l'appariement entre les différents thèmes des représentations cartographiques des extrémités du continuum comme un pré-requis à l'utilisation de nos méthodes de symbolisation et traitons les thèmes un par un dans un premier temps. Les représentations cartographiques que nous utilisons comme extrémités sont considérées comme ayant une structure de légende identique. Par structure de légende identique, nous entendons que les données sont organisées selon des arbres de légendes présentant exactement les mêmes lignes de légendes, ou des sous-ensembles d'un même arbre de légende commun, comme c'est le cas de tous les sous-arbres présentés en figure 4.22. De plus, le fond cartographique et le fond orthophotographique sont appariés entre eux et correspondent à un même thème de l'arbre commun aux deux légendes à appairer : une des extrémités peut donc être simplement une orthophotographie.

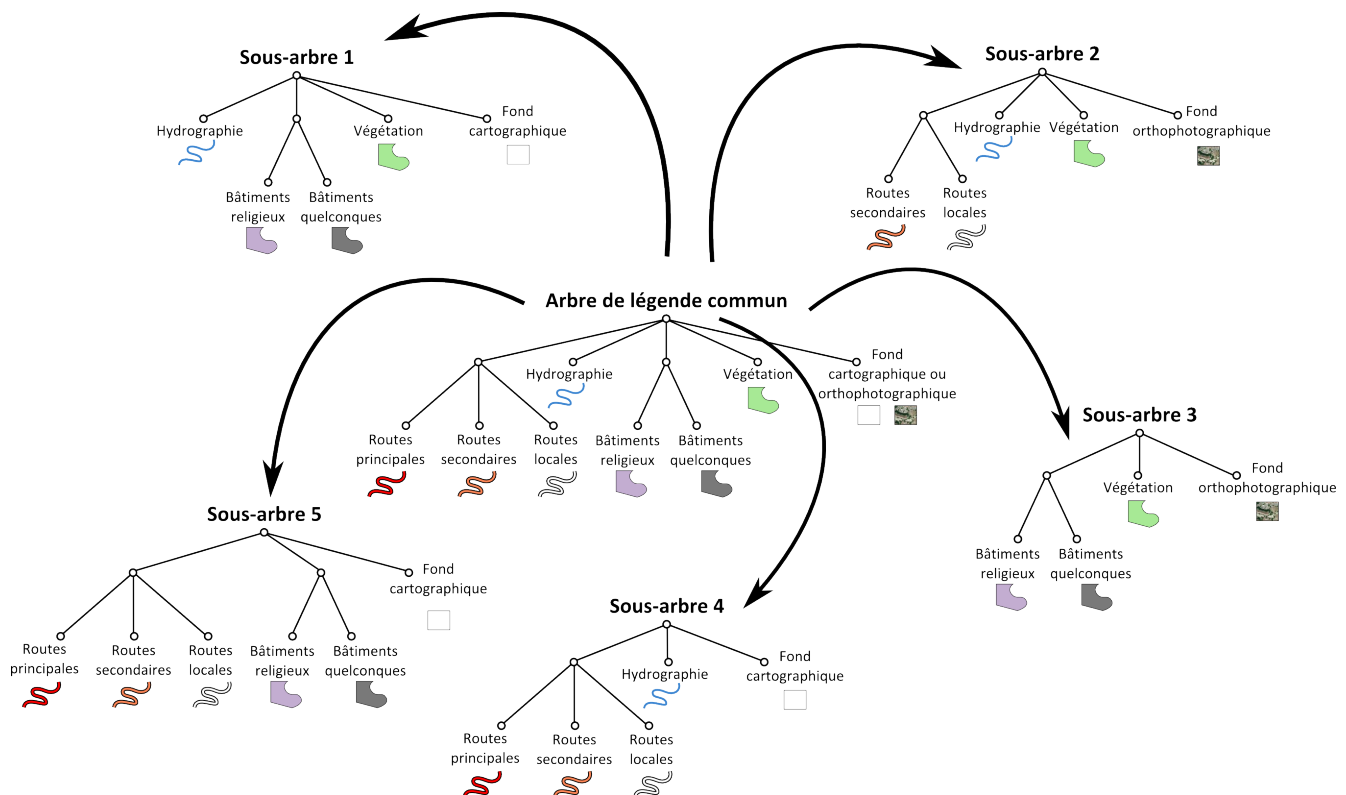


FIGURE 4.22 : Ensemble de sous-arbres de légende issus d'un même arbre commun.

Les thèmes cartographiques de nos extrémités sont considérés comme ayant été appariés un

à un. Notre démarche d'interpolation de symbolisation est mise en place pour chaque couple de thèmes appariés.

4.2.2.1 Symbolisation de médiation entre symbolisations extrêmes

Pour décrire les symbolisations cartographiques, nous nous appuyons sur deux normes de l'Open-Geospatial Consortium (OGC) : la norme Symbology Encoding [Müller, 2006] qui modélise les propriétés graphiques applicables à des objets cartographiques pour dessiner une carte, et la norme Styled Layer Descriptor [Lupp, 2007] qui modélise l'empilement des styles des couches composant une carte. La figure 4.23 présente les concepts principaux des normes SLD et SE permettant de décrire pour chaque thème cartographique une couche de style (classe **LayerSLD**) composé de plusieurs styles (classe **Style**), eux-mêmes composés de **Symbolizer** qui permettent de décrire des symbolisations de cinq types différents selon la nature des objets cartographiques qu'elle représente :

- un **PolygonSymbolizer** si le thème est constitué d'objets surfaciques
- un **LineSymbolizer** si le thème est constitué d'objets linéaires
- un **PointSymbolizer** si le thème est constitué d'objets ponctuels
- un **RasterSymbolizer** si le thème est un raster (Cf. annexe A.1)
- un **TextSymbolizer** si le thème est constitué de toponymes

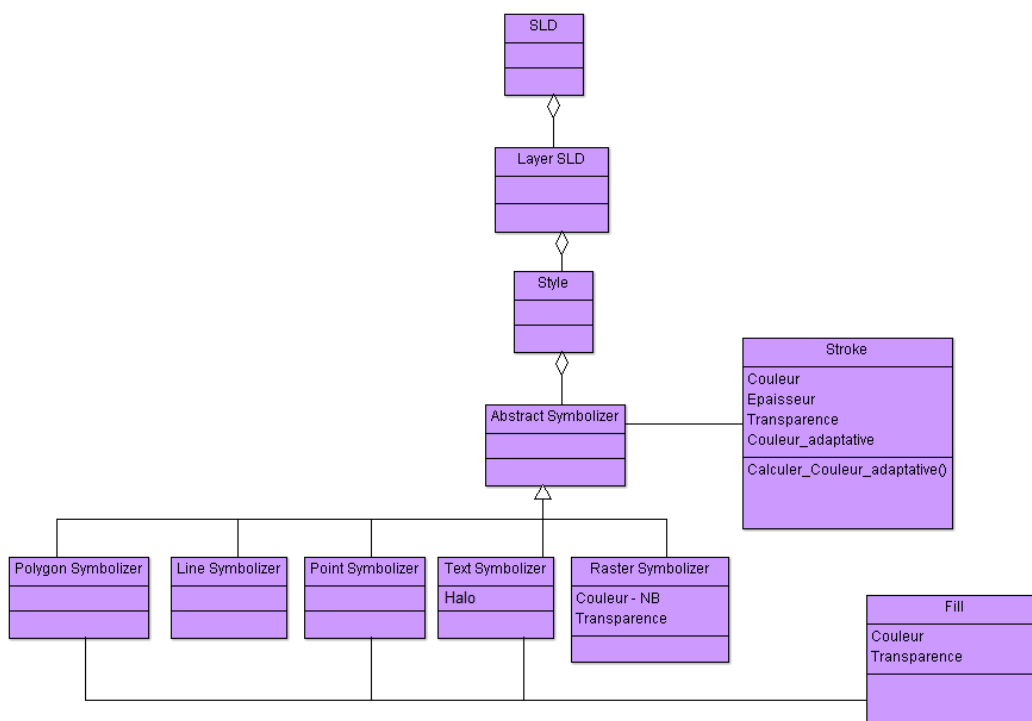


FIGURE 4.23 : Modélisation des normes de symbolisation cartographique SE/SLD sur lesquelles nous nous appuyons.

Éléments de symbolisation Pour modéliser une symbolisation, les différents **Symbolizers** sont décrits par des classes et paramètres de la norme SE, que nous appelons génériquement

éléments de symbolisation. Ceux-ci permettent au cartographe de décrire la symbolisation des lignes de légende et de mettre en œuvre les variables visuelles classiques.

Nous listons ici les classes et paramètres de la norme SE (que nous appelons "élément de symbolisation" par la suite) les plus pertinents vis-à-vis d'une utilisation de notre méthode d'interpolation :

- La classe **Stroke** indique la présence d'un contour pour un objet surfacique ou ponctuel, ou encore pour le trait représentant un objet linéaire.
- La classe **Fill** renseigne le mode de remplissage pour un objet surfacique, un ponctuel ou encore pour un toponyme.
- Les paramètres **Couleur** des classes **Stroke** et **Fill** indiquent la couleur du contour ou du remplissage des objets.
- Les paramètres **Transparence** des classes **Stroke** et **Fill** indiquent l'opacité du contour ou du remplissage des objets.
- Le paramètre **Halo** permet de définir un masque coloré entourant les toponymes.
- Le paramètre **Epaisseur** permet de définir l'épaisseur des contours ou des traits.

De plus, la figure 4.23 présente deux extensions aux normes SLD et SE permettant la mise en œuvre de notre méthode d'adaptation locale de la symbolisation : le paramètre **Couleur adaptative** indiquant la couleur adaptée au contexte graphique de l'objet symbolisé et la méthode **Calculer Couleur Adaptative()** permettant de calculer cette **Couleur adaptative**.

Définition du concept de symbolisation de médiation La première étape de notre méthode d'interpolation de symbolisation consiste à construire un canevas pour les symbolisations intermédiaires du thème cartographique en cours de traitement que nous appelons symbolisation de médiation.

Nous définissons une **symbolisation de médiation** comme étant une symbolisation exhaustive et partagée regroupant l'ensemble des éléments des symbolisations des thèmes des extrémités.

Les symbolisations de médiation seront décrites dans le formalisme de la norme SE présenté en figure 4.23, sous la forme d'un **Symbolizer**.

Règles de construction de symbolisation de médiation Nous proposons une démarche de construction de symbolisation de médiation sous la forme de règles de construction. Pour cela, nous énonçons deux règles :

Règle 1 : Les éléments de symbolisation communs aux deux symbolisations extrêmes seront appariés et ajoutés à la symbolisation de médiation.

Par exemple, si les deux symbolisations extrêmes comportent un contour, alors la symbolisation de médiation comportera automatiquement un contour.

Règle 2 : Si un élément de symbolisation est présent seulement dans une extrémité, alors il sera présent dans la symbolisation de médiation avec des paramètres permettant sa disparition.

Par exemple, si seulement une symbolisation extrême comporte un contour, la symbolisation de médiation comportera un contour soit avec un paramètre de taille, soit avec un paramètre d'opacité, soit avec les deux. Ainsi, le contour pourra devenir invisible, c'est-à-dire soit d'épaisseur nulle soit totalement transparent.

Exemple de construction d'un symbolisation de médiation Nous déroulons la construction d'une symbolisation de médiation à partir des deux symbolisations de la figure 4.24. Ces symbolisations sont accompagnées de leur formalisation au format de la norme SE. La symbolisation de gauche est constituée d'un contour épais bleu foncé et d'un mode de remplissage en aplat bleu transparent. Elle est donc décrite par un élément **Stroke** pour le contour ayant deux paramètres, un pour définir la couleur et l'autre pour son épaisseur, ainsi qu'un élément **Fill** pour le mode de remplissage ayant deux paramètres, un pour définir la couleur du remplissage et l'autre pour sa transparence. La symbolisation de droite comporte uniquement un mode de remplissage régulier à partir d'un motif en forme de croix, sans contour. Elle est donc décrite par un seul élément **Fill** contenant un ensemble de paramètres permettant de décrire l'image du motif en forme de croix, son format, et sa taille.

```
<PolygonSymbolizer>
  <Stroke>
    <stroke>#330099</stroke>
    <stroke-width>2.0</stroke-width>
  </Stroke>
  <Fill>
    <fill>#00aaff</fill>
    <fill-opacity>0.6</fill-opacity>
  </Fill>
</PolygonSymbolizer>
```

```
<PolygonSymbolizer>
  <Fill>
    <GraphicFill>
      <Graphic>
        <Size>10.0</Size>
        <ExternalGraphic>
          <href>./motif.png</href>
          <Format>png</Format>
        </ExternalGraphic>
      </Graphic>
    </GraphicFill>
  </Fill>
</PolygonSymbolizer>
```

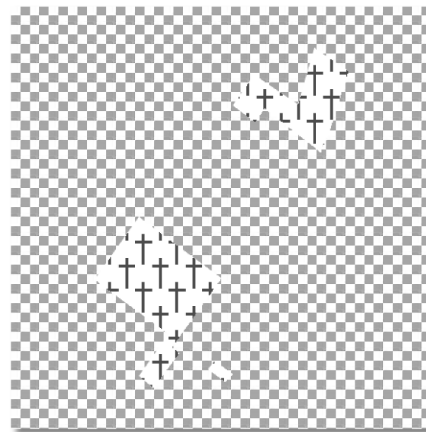
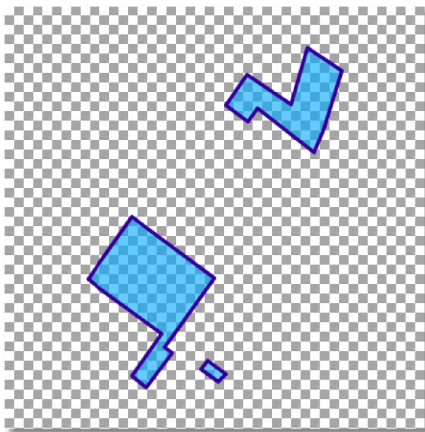


FIGURE 4.24 : Exemple de symbolisations extrêmes pour symboliser des objets surfaciques

La figure 4.25 présente une symbolisation de médiation créée à partir des deux symbolisations de la figure 4.24, dans le formalisme de la norme SE. Pour construire cette symbolisation, les deux règles de construction ont été mises en œuvre :

- Conformément à la règle n° 1, les éléments des deux symbolisations à apparier ont été ajoutés. Ainsi, la symbolisation de médiation proposée comporte un contour (élément **Stroke**) dont on peut préciser la couleur, l'épaisseur et l'opacité, ainsi qu'un mode de remplissage (élément **Fill**) mixte combinant les paramètres d'un aplat transparent (couleur et transparence) et les paramètres de distribution régulière de motifs.

- Conformément à la règle n° 2, les paramètres d'opacité du contour, de l'aplatissement et des poncifs ont été ajoutés à la symbolisation de médiation afin de pouvoir obtenir un rendu similaire à celui des symbolisations extrêmes présentées en figure 4.24 : il faut pouvoir faire disparaître graphiquement les éléments superflus tels que le contour et l'aplatissement pour l'extrémité de droite, et les poncifs pour l'extrémité de gauche. Cependant, la disparition du contour aurait également pu être réalisée par une diminution du contour jusqu'à une taille nulle. Ainsi, il apparaît qu'il n'y a pas nécessairement une solution unique de symbolisation de médiation pour un couple de symbolisations.

À ce stade de la méthode d'interpolation, la symbolisation de médiation est une symbolisation vide, c'est-à-dire que les valeurs de ses éléments de symbolisation ne sont pas encore renseignées. C'est pour cela qu'ils sont représentés par des points d'interrogation sur la figure 4.25. Ils seront renseignés à la fin de notre méthode d'interpolation. En effet, chaque valeur sera obtenue par interpolation de celles des extrémités afin d'obtenir des états intermédiaires de symbolisation.

```
<PolygonSymbolizer>
  <Stroke>
    <stroke>?</stroke>
    <stroke-opacity>?</stroke-opacity>
    <stroke-width>?</stroke-width>
  </Stroke>
  <Fill>
    <fill>?</fill>
    <fill-opacity>?</fill-opacity>
    <GraphicFill>
      <Graphic>
        <opacity>?</opacity>
        <Size>?</Size>
        <ExternalGraphic>
          <href>./motif.png</href>
          <Format>png</Format>
        </ExternalGraphic>
      </Graphic>
    </GraphicFill>
  </Fill>
</PolygonSymbolizer>
```

FIGURE 4.25 : Symbolisation de médiation pour l'interpolation entre les symbolisations de la figure 4.24.

La figure 4.25 présente des exemples de symbolisations intermédiaires pouvant être décrites à partir de la symbolisation de médiation de la figure 4.26. Ces états intermédiaires potentiels sont différents car ils ont été obtenus en définissant des valeurs différentes pour les paramètres de la symbolisation de médiation : ils présentent donc des contours plus ou moins épais et transparents, et un mode de remplissage avec un aplatissement des poncifs plus ou moins transparent.

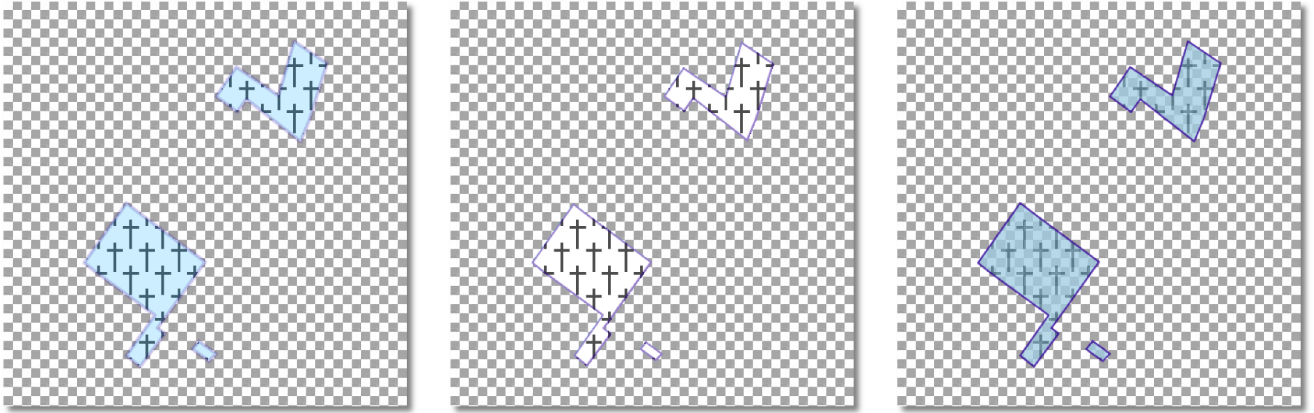


FIGURE 4.26 : Exemples de symbolisation intermédiaires entre celles de la figure 4.24 grâce à la symbolisation de médiation présentée en figure 4.25.

Deux corollaires découlent directement de ces règles et permettent de vérifier la complétude et l'exhaustivité de la symbolisation de médiation établie.

Corollaire 1 : Tout élément de symbolisation des extrémités doit être présent dans la symbolisation de médiation

Corollaire 2 : La symbolisation des extrémités doit pouvoir être obtenue à l'identique en utilisant les éléments de symbolisation de la symbolisation de médiation.

Ce deuxième corollaire implique de prévoir des versions neutres des différents éléments de symbolisation comme une absence de couleur ou de texture et une méthode d'interpolation permettant la disparition graphique vers ces versions neutres.

4.2.2.2 Méthodes d'interpolation de symbolisation

La dernière étape de notre méthode d'interpolation consiste à interpoler les valeurs des éléments de notre symbolisation de médiation. L'enjeu est d'identifier et de prendre en compte les spécificités de chaque type d'élément au sein de la méthode d'interpolation choisie. Comme nous souhaitons créer un chemin graphique régulier, nous utilisons la méthode d'interpolation linéaire consistant à utiliser une fonction affine entre les deux valeurs de nos extrémités et dont la formule est donnée par l'équation 4.5.

$$\begin{aligned} f &: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto f(x) = \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} \cdot x + \frac{x_a \cdot y_b - x_b \cdot y_a}{x_a - x_b} \end{aligned} \quad (4.5)$$

où, dans notre cas, x est la variable représentant les différentes étapes d'interpolation et $f(x)$ la variable que nous souhaitons interpoler ; x_a et y_a sont les coordonnées dans cet espace de l'extrémité a et x_b et y_b les coordonnées dans cet espace de l'extrémité b .

ÉQUATION 4.5 – Fonction d'interpolation linéaire

Dans ce paragraphe, nous préconisons différentes façons d'appliquer cette méthode d'interpolation linéaire aux différents paramètres de symbolisation que nous souhaitons décliner : la couleur et la texture.

1 - Interpolation de la couleur : *dégrader* la couleur sans l'altérer. L'interpolation entre deux ou plusieurs couleurs permet la création de dégradés colorés. L'enjeu de notre proposition d'interpolation de la couleur est de permettre la création de dégradés colorés sans altérer la perception de la couleur le long de ces dégradés. L'objectif est de créer des dégradés fidèles à la perception humaine, c'est-à-dire fournissant une évolution de la couleur continue et linéaire par rapport à cette perception.

Une carte **choroplèthe** est un type de carte thématique représentant une information quantitative de rapport par une variation de la variable visuelle couleur.

En cartographie, la construction de dégradés de couleurs est utile à la construction de cartes *choroplèthes*. Pour cela, la qualité d'un dégradé de couleur est dépendante de la capacité du lecteur de la carte à différencier les paliers du dégradé. Dans cette optique, [Brewer \[1999\]](#) propose des dégradés colorés adaptés à la cartographie pour aider à la conception de cartes choroplèthes, tandis que [Jégou \[2014\]](#) explore les harmonies colorées de sources d'inspirations artistiques en vue de créer des dégradés expressifs.

Notre objectif de création de dégradés colorés est sensiblement différent. En effet, nous ne visons pas à concevoir des cartes choroplèthes mais des représentations cartographiques intermédiaires entre deux représentations topographiques. Pour cette application spécifique, la création de dégradé n'est pas contrainte par une exigence de distinction des couleurs au sein du dégradé. En revanche, notre méthode d'interpolation a pour objet de créer un chemin graphique continu et évoluant régulièrement. À ce titre, la construction de dégradés de couleurs est réalisée par une interpolation linéaire dans le système colorimétrique CIELab. Ce choix garantit que la navigation d'une couleur intermédiaire à la suivante se fera avec une variation perceptuelle constante de la couleur. Cela permet d'assurer une continuité colorimétrique entre les représentations cartographiques du continuum en construction. La figure 4.27 présente un exemple de dégradé coloré du violet au vert, duquel dix-huit paliers ont été dégagés régulièrement pour former un dégradé de vingt couleurs. Ces paliers sont présentés en quinconce le long du dégradé et reliés par un trait indiquant leur position dans le dégradé.

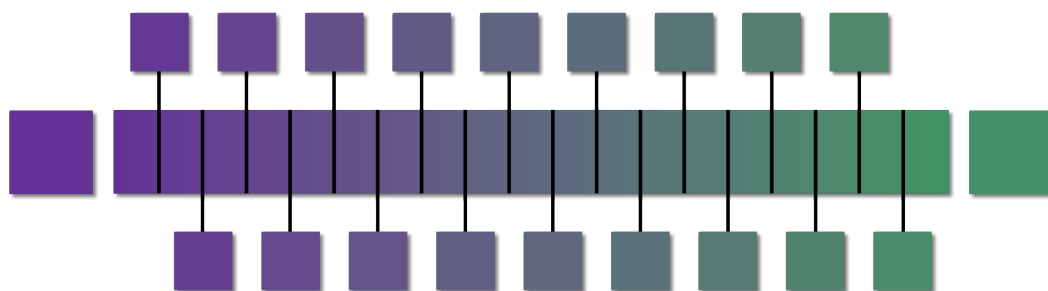


FIGURE 4.27 : Dégradé de couleurs dans le système CIELab

Pour illustrer la régularité de la perception colorée le long du dégradé obtenu par interpolation linéaire des coordonnées colorimétriques dans le système CIELab, la figure 4.28 compare les vingt couleurs de ce dégradé avec les vingt couleurs du dégradé que l'on obtiendrait en interpolant les couleurs dans le système RVB. Les vingt couleurs de ces deux dégradés ont été projetées dans le plan chromatique du système CIELab formé par les axes a et b. Dans ce plan, la distance euclidienne entre deux couleurs correspond à la perception de différence entre ces deux couleurs. Ainsi, un dégradé régulier formera une droite dans ce plan. C'est pourquoi nous présentons en figure 4.28 les dégradés dans ce plan chromatique. Cela nous permet de conclure à la régularité du dégradé obtenu dans le système CIELab (ce qui était attendu en réalisant une interpolation

dans le même système) mais surtout, cela prouve que l'interpolation linéaire dans le système RVB ne permet pas de produire un dégradé de couleurs régulier.

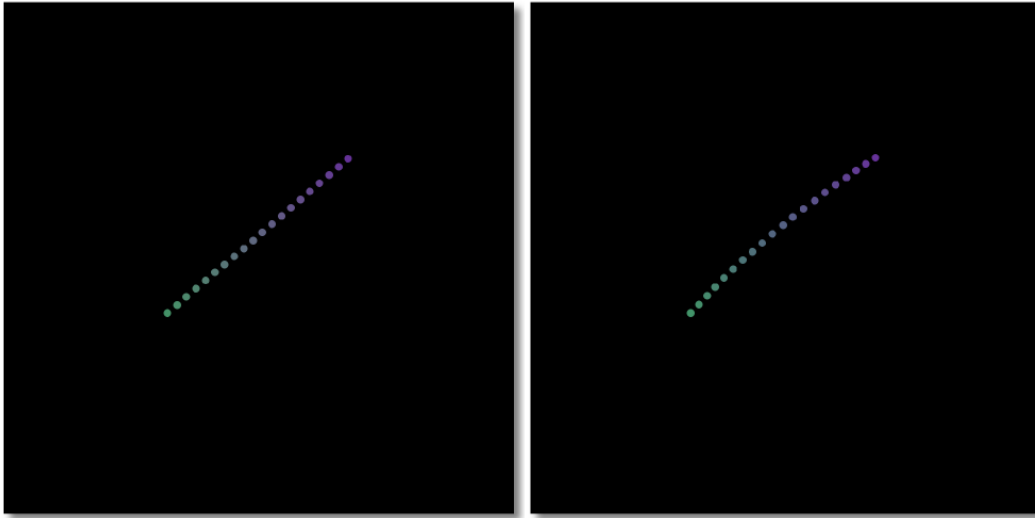



FIGURE 4.28 : Comparaison de dégradés linéaires dans le système CIE Lab et le système RVB.

Dans la suite de ce mémoire, la brique d'interpolation de couleurs que nous venons de présenter sera représentée par l'image schématique  indiquant les couleurs entre lesquelles on souhaite réaliser l'interpolation (ici du jaune et du vert) et symbolisant l'interpolation réalisée par un dégradé coloré entre les couleurs initiale et finale.

a - Exemple pour un ensemble de thèmes cartographiques Dans ce paragraphe, l'interpolation de couleurs dans le système CIE Lab est réalisée pour les symbolisations des différents thèmes d'une représentation cartographique. Les extrémités choisies sont deux représentations cartographiques présentant des aplats de couleurs vifs et contrastés, issues d'une stylisation selon le courant artistique PopArt proposé par [Christophe et Hoarau \[2012\]](#). Les couleurs des différents éléments de symbolisation de ces représentations ont été interpolées par la méthode décrite ci-dessus pour former un ensemble de légendes cartographiques. L'interpolation est donc réalisée séparément pour chaque élément de symbolisation coloré : le fond de carte, le remplissage de l'hydrographie, le remplissage de la végétation, les traits du réseau routier, le remplissage des bâtiments et la couleur et halo des toponymes. La figure 4.29 présente les deux extrémités sélectionnées, les six briques d'interpolation mises en œuvre pour interpoler les symbolisations des thèmes de la représentation (végétation, hydrographie, fond de carte, bâtiments, routes toponymes et halo des toponymes) et trois représentations intermédiaires. Cet ensemble de représentations permet d'illustrer qu'il est possible d'obtenir un chemin graphique continu en interpolant les couleurs des thèmes cartographiques. Cependant, en l'état, notre méthode ne permet pas de garantir que les relations entre les couleurs des extrémités seront préservées au sein des représentations intermédiaires.

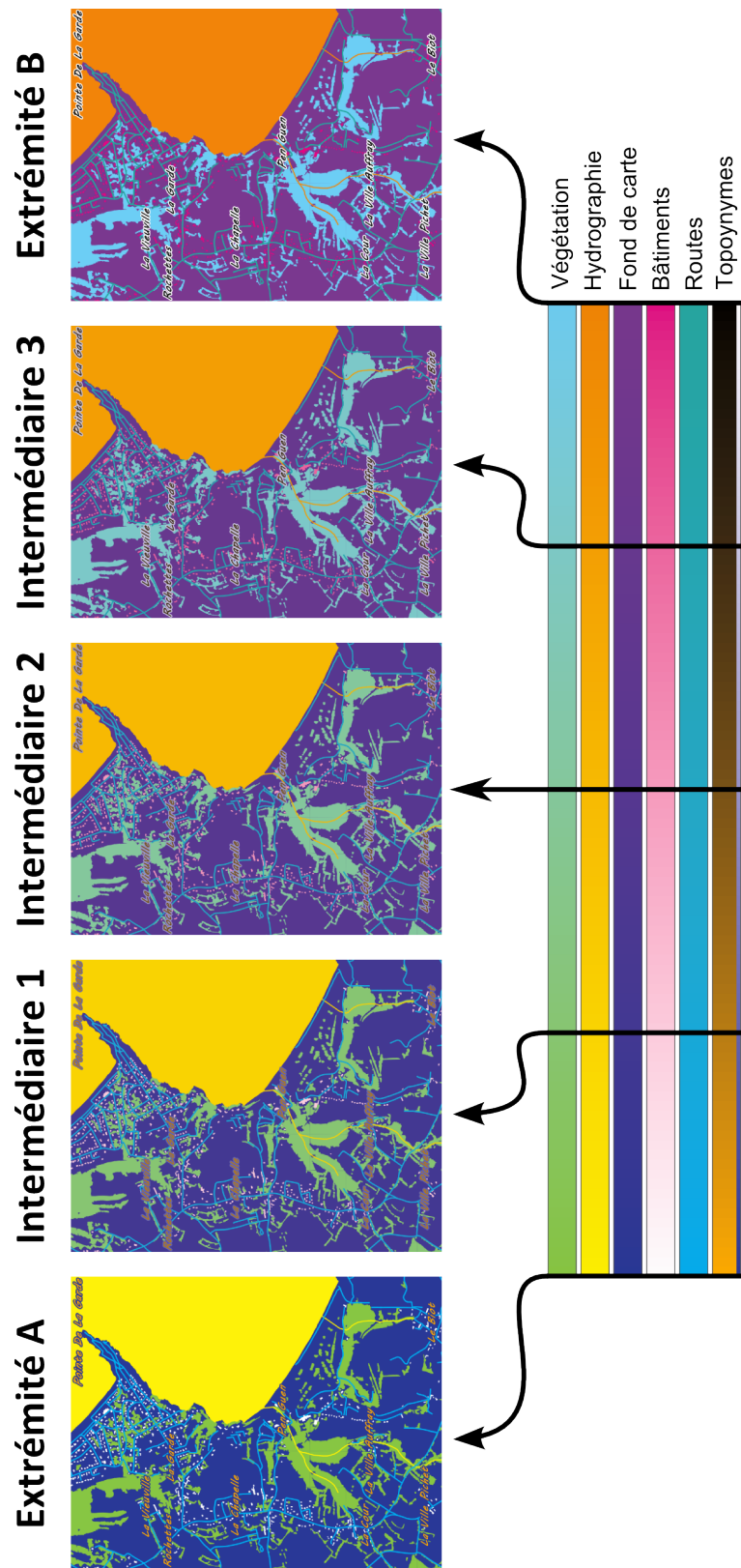


FIGURE 4.29 : Couleur progressive pour une carte vectorielle

b - Exemple entre différents fonds cartographiques et orthophotographiques Dans ce paragraphe, nous proposons un processus de passage d'un fond orthophotographique à un fond cartographique blanc par traitement d'image en manipulant les pixels de l'orthophotographie de départ. Cet exemple est motivé par la volonté de faire évoluer séparément la couleur et la texture du fond orthophotographique. Dans un premier temps, la couleur sera interpolée entre l'orthophotographie en couleur et l'orthophotographie en niveaux de gris. Puis la texture de l'orthophotographie sera manipulée indépendamment de la couleur, entre l'orthophotographie en niveaux de gris et le fond cartographique en aplat blanc. Ainsi, le processus d'interpolation entre un fond orthophotographique et un fond cartographique en utilisant l'orthophotographie en niveaux de gris comme symbolisation pivot se déroule en plusieurs étapes présentées en figure 4.30.

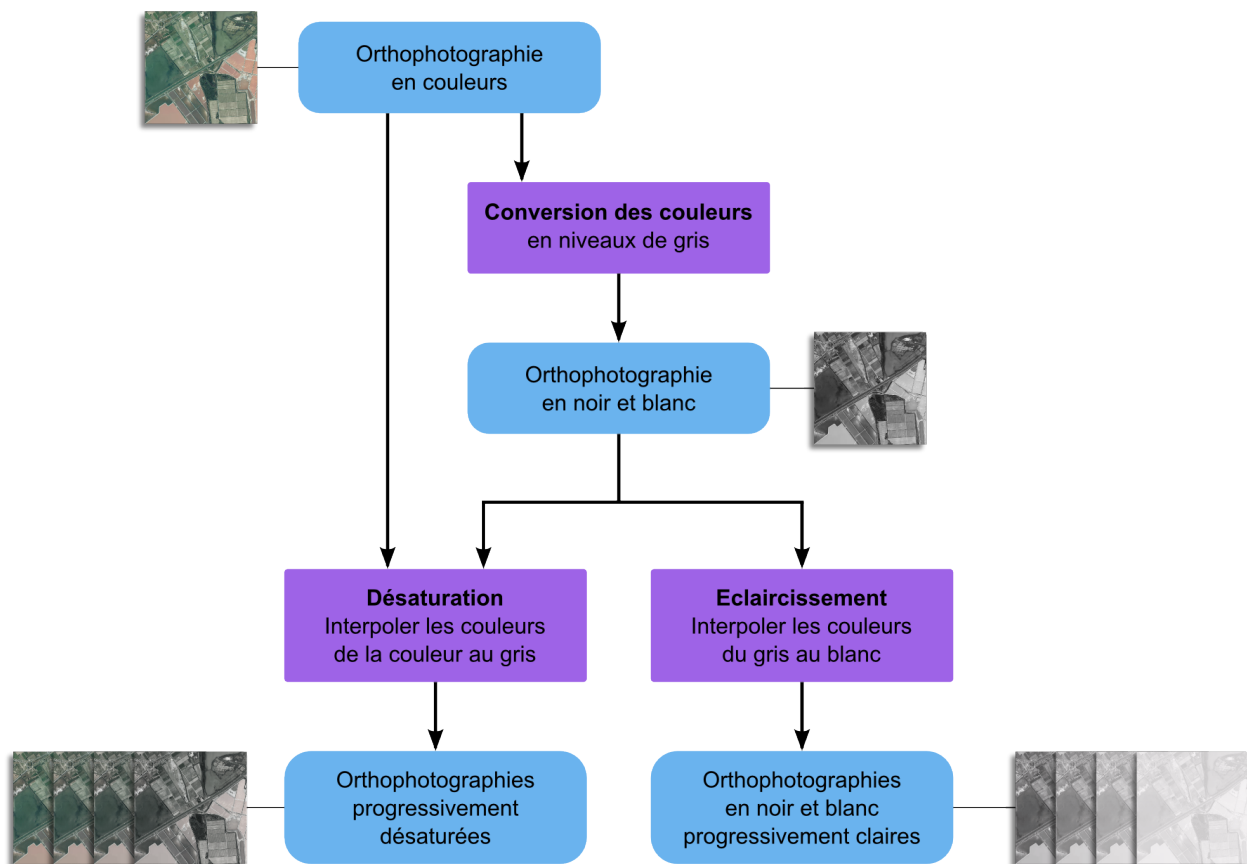


FIGURE 4.30 : Processus de désaturation et éclaircissement progressif de l'orthophotographie

La première étape nécessaire est préalable à l'interpolation : elle consiste à convertir l'orthophotographie en niveaux de gris. Dans un second temps, les couleurs de l'orthophotographie sont interpolées pour être désaturées progressivement vers l'orthophotographie en niveaux de gris, puis éclaircies progressivement jusqu'au fond cartographique blanc. Cette double phase d'interpolation est réalisée pixel par pixel. C'est ce qui nous permet de manipuler la texture naturelle au sein de l'interpolation de couleur, sans la modifier. La figure 4.31 présente dans la ligne supérieure quatre étapes intermédiaires de désaturation de l'orthophotographie en couleur vers sa version en niveaux de gris, et dans la ligne inférieure quatre étapes intermédiaires d'éclaircissement de l'orthophotographie en noir et blanc.

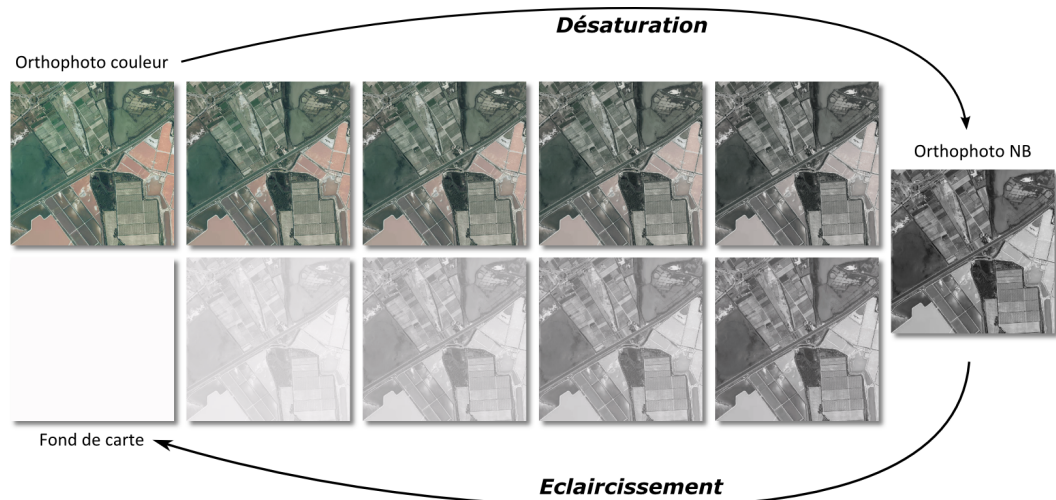




FIGURE 4.31 : Désaturation et éclaircissement progressifs d'une orthophotographie.

c - Exemple pour la coloration progressive d'une texture procédurale La modification des couleurs de la texture de Perlin ne modifie pas sa structure. Ainsi, ces paramètres peuvent être interpolés linéairement afin de créer des transitions graphiques continues. Pour cela, il existe deux possibilités :

- Si les textures entre lesquelles on souhaite interpoler la couleur présentent une couleur commune, c'est uniquement l'autre couleur qui sera interpolée selon la méthode détaillée ci-dessus. Dans la suite de ce mémoire, cette brique d'interpolation sera appelée **brique de coloration simple de la texture de Perlin**.

Elle sera représentée par l'image schématique suivante  indiquant par des cercles colorés les couleurs des textures initiales et finales (ici blanc et vert d'une part et jaune et vert d'autre part) présentées aux extrémités, et symbolisant l'interpolation par un dégradé de texture colorée.

- Si les textures entre lesquelles on souhaite interpoler la couleur présentent deux couleurs différentes, l'interpolation sera réalisée en deux temps. Une texture pivot réalisée avec une couleur de chaque extrémité est utilisée. L'interpolation se fait donc des deux côtés de la texture de l'extrémité vers la texture pivot, de la même façon que pour la brique de coloration simple. Dans la suite de ce mémoire, cette brique d'interpolation sera appelée **brique de coloration double de la texture de Perlin**.

Elle sera représentée par l'image schématique suivante  indiquant par des cercles colorés les couleurs des textures initiales et finales (ici jaune et vert clair d'une part et blanc et vert foncé d'autre part) présentées aux extrémités, et les couleurs de la texture pivot (ici blanc et vert clair) présentées au centre et symbolisant l'interpolation par un double dégradé de texture colorée.

La figure 4.32 présente des exemples de transitions colorées obtenues par coloration simple de quatre textures de Perlin. Quatre couples de couleurs ont ainsi été appliqués pour créer les textures des coins de la figure 4.32 : du vert clair et du blanc en haut à gauche, du vert clair et

du jaune en haut à droite, du vert foncé et du jaune en bas à droite et du vert foncé et du vert clair en bas à gauche. Puis ces couples de couleurs ont été interpolés deux à deux pour créer les dégradés de textures des frises des bords de la figure 4.32, et enfin une double interpolation verticale et horizontale a été utilisée pour créer la texture centrale de la figure 4.32.

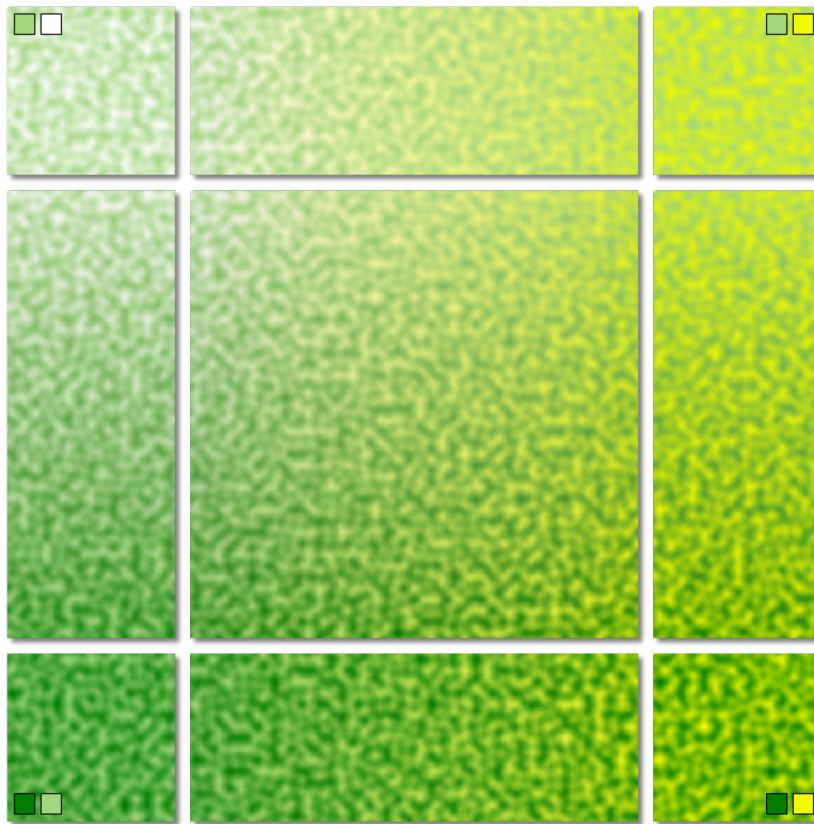


FIGURE 4.32 : Double dégradé coloré dans la texture de Perlin.

2 - Interpolation de la texture : faire réaliste ou naturel La deuxième caractéristique graphique de symbolisation que nous souhaitons interpoler est la texture. Ce type d'interpolation nous permettra de contrôler le degré de réalisme en introduisant plus ou moins de texture naturelle issue de l'orthophotographie ou de texture procédurale réaliste. Pour cela, nous disposons de deux paramètres de symbolisation que nous pouvons interpoler : la transparence d'une couche vectorielle superposée à une symbolisation texturée (comme un extrait d'orthophotographie), et la visibilité de la texture procédurale que nous introduisons. Ces deux paramètres sont traités indépendamment dans les deux paragraphes suivants. Ils pourraient également être manipulés simultanément dans le cas d'une texture mixte.

Gestion de la transparence Notre étude de l'utilisation des fonds de carte au sein d'applications cartographiques conçues à partir de l'API du Géoportail (Cf. § 1.4) a permis d'établir que la superposition de deux fonds de carte par transparence est une méthode de co-visualisation à éviter. En effet, cette méthode peut créer des représentations cartographiques illisibles ou difficilement interprétables. En conséquence, nous préconisons une utilisation raisonnée de la transparence : ce paramètre de symbolisation peut être interpolé pour un ou plusieurs thèmes

cartographiques, mais pas pour la représentation dans son ensemble. En particulier, l'interpolation du paramètre de transparence permet de faire disparaître un élément de symbolisation comme un contour ou un mode de remplissage qui ne serait pas présent dans l'une des extrémités. Cela permettra également de contrôler l'injection de la texture naturelle de l'orthophotographie. Dans tous les cas, le paramètre de transparence est interpolé linéairement entre 0, pour une couleur totalement transparente, et 100, pour une couleur opaque. La figure 4.33 illustre une interpolation linéaire de la transparence de la couleur de la mer (aplat bleu clair) sur un fond neutre (quadrillage blanc et gris). Dans cette figure, les représentations intermédiaires (au sein desquelles la transparence de la mer est plus ou moins forte) sont présentées entre la symbolisation totalement opaque (en aplat bleu) à gauche et la symbolisation totalement transparente (sur un fond neutre quadrillé) à droite. La frise au dessous des représentations illustre l'évolution de la symbolisation selon l'interpolation de la transparence.

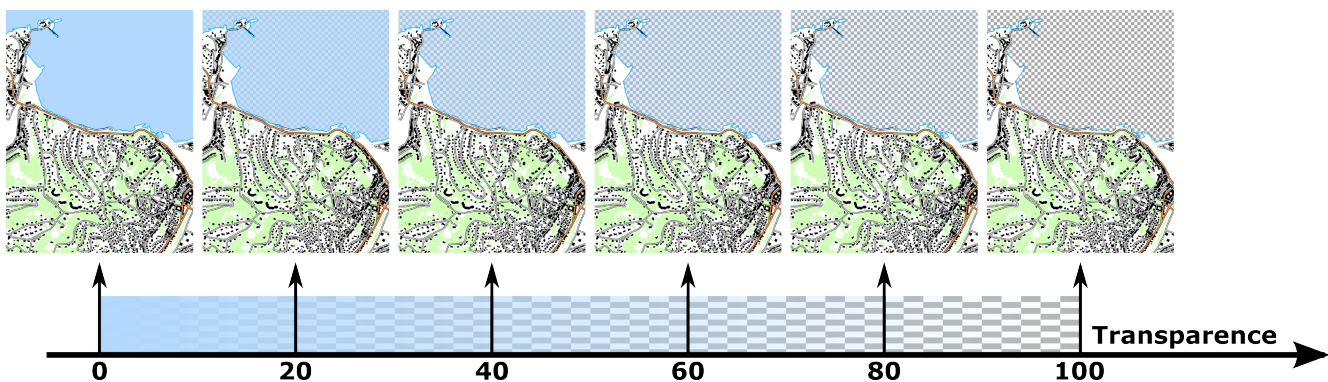



FIGURE 4.33 : Utilisation progressive de la transparence pour faire disparaître la mer.

Cette brique d'interpolation est appelée **brique de transparence** dans la suite de ce mémoire. Lorsque l'interpolation de transparence est réalisée sur une couche superposée à une orthophotographie, l'évolution de la transparence permet de faire apparaître ou disparaître la texture naturelle de l'orthophotographie.

C'est pourquoi elle est représentée par l'image schématique suivante  indiquant d'une part une texture naturelle et d'autre part une absence de texture par un aplat blanc et symbolisant l'interpolation par une frise de texture naturelle.

Apparition et disparition d'une texture procédurale Les paramètres de quantité et de couleur ne modifient pas la structure de la texture de Perlin. En conséquence, ils peuvent être utilisés pour faire apparaître ou disparaître la texture en la transformant progressivement en aplat de couleur. Pour cela, le paramètre de quantité est interpolé entre son minimum et son maximum, et le paramètre de couleur peut être interpolé entre une texture réalisée avec deux couleurs identiques et une texture réalisée avec deux couleurs différentes, comme illustré par les frises de la figure 4.34.

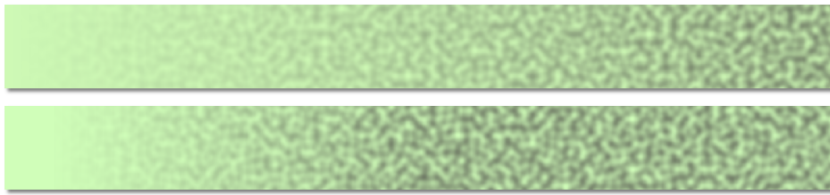



FIGURE 4.34 : Disparition de la texture par variation de la quantité en haut et de la couleur en bas.

Nous recommandons d'utiliser la brique d'interpolation de la quantité pour faire apparaître ou disparaître une texture procédurale car elle manipule le paramètre destiné à contrôler la proportion visible de texture. A contrario, l'utilisation d'une brique de coloration simple ne permet pas de contrôler la régularité de la perception de l'apparition ou de la disparition de la texture. De plus, si les deux couleurs de la texture finale sont très différentes, l'interpolation entre ces deux couleurs peut conduire à l'utilisation de couleurs significativement différentes et générer des couleurs non désirées. Ce phénomène ne peut pas se produire dans le cas d'une interpolation de la quantité de texture puisque ce ne sont pas les couleurs qui sont manipulées mais les valeurs de la fonction de bruit de Perlin utilisée pour générer la texture. Ainsi dans la suite du mémoire, c'est l'interpolation de quantité qui sera utilisée pour faire apparaître ou disparaître la texture de Perlin. Cette brique d'interpolation est appelée **brique de texturation procédurale**.

Elle est représentée par l'image schématique suivante  indiquant d'une part une texture procédurale et d'autre part une absence de texture par un aplat blanc et symbolisant l'interpolation par une frise de texture procédurale.

Nous avons proposé un ensemble de briques d'interpolation de symbolisation permettant de créer une multitude de chemins graphiques entre deux symbolisations. Ces briques peuvent être affectées et mises en œuvre indépendamment pour les différents thèmes des extrémités de notre continuum. Cela permet de créer une infinité de chemins graphiques entre ces extrémités.

4.2.3 Coordination de symbolisations pour l'homogénéisation de la représentation

Conformément à notre objectif de conception d'un continuum cartographique au sein duquel l'évolution du style est régulière, l'enjeu de ce paragraphe est de décrire comment les briques d'interpolation présentées au paragraphe précédent peuvent être utilisées conjointement pour créer des représentations cartographiques homogènes. En effet, ces briques d'interpolation définissent des symbolisations pour les différentes couches composant les représentations cartographiques intermédiaires indépendamment les unes des autres. Selon comment elles sont appliquées à l'un ou l'autre des thèmes, elles permettent la création d'un très grand nombre de représentations cartographiques intermédiaires différentes. La multiplicité des chemins potentiels offerte par notre modèle pour construire un ou plusieurs continuums cartographiques à partir de deux représentations cartographiques extrêmes est illustrée par l'ensemble de possibles cartographiques obtenus par affectation d'une ou plusieurs briques de symbolisation sur le fond de carte, la mer,

la végétation, le réseau routier et les bâtiments présentés en figure 4.35.

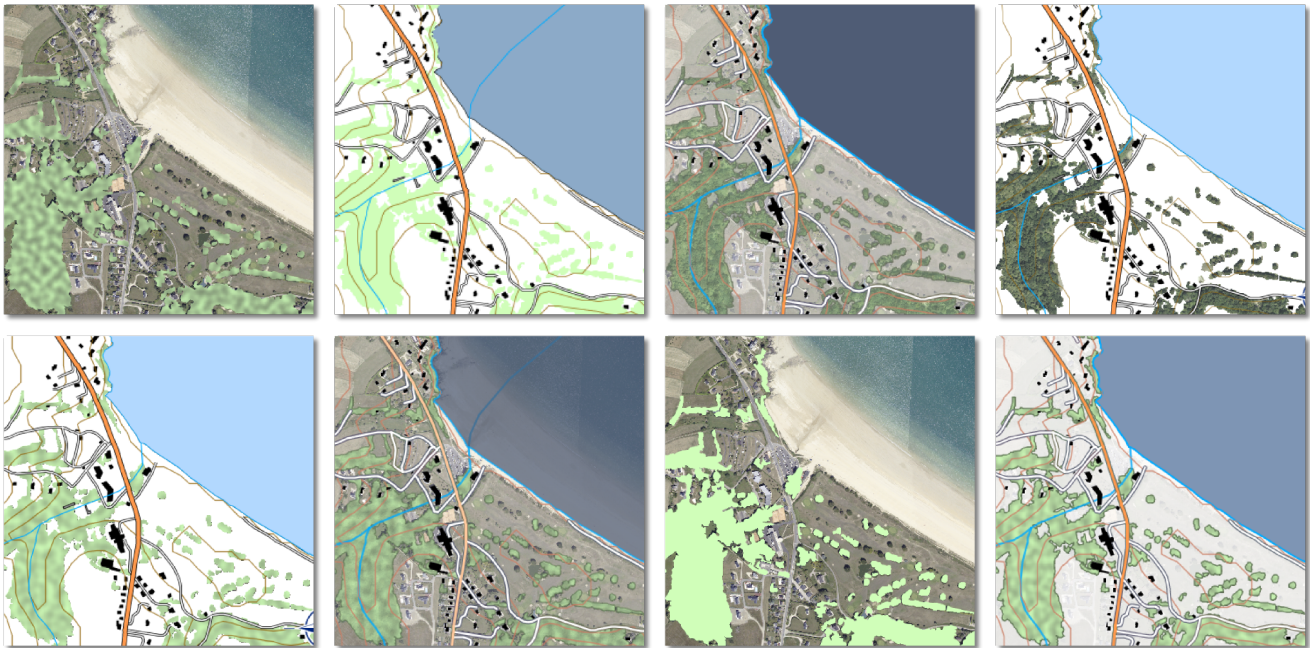


FIGURE 4.35 : Diversité des possibles cartographiques issus de l'utilisation des briques de symbolisation

Les étapes d'affectation et de combinaison de briques participent à étendre l'espace des possibles cartographiques que l'on peut créer pour deux extrémités données. Cependant, l'étape de synchronisation vise à satisfaire notre exigence d'homogénéité de la représentation. Elle implique donc de restreindre l'espace des possibles aux représentations respectant cette contrainte de conception.

Pour cela, nous indiquons des préconisations pour les trois étapes de coordination des symbolisations que sont l'affectation des briques aux différents thèmes (Cf. §4.2.3.1), la combinaison des briques affectées à un même thème (Cf. §4.2.3.2) et la synchronisation des symbolisations des différents thèmes (Cf. §4.2.3.3).

4.2.3.1 Affectation des briques de symbolisation

L'affectation d'une brique à un élément de symbolisation dépend de la structure des symbolisations extrêmes du continuum en construction et de leurs différences. Nous présentons trois principes d'affectation d'une brique de symbolisation à un thème et une recommandation.

Principe 1 : Permettre la disparition d'un élément présent dans une seule extrémité

Certaines briques seront automatiquement affectées à un élément de symbolisation en fonction des différences existant entre les symbolisations des extrémités du continuum. En effet, lorsqu'un élément sera présent uniquement dans une des deux symbolisations extrêmes, une brique sera affectée pour permettre à cet élément de disparaître. Ce sera une brique de transparence ou de texturation procédurale.

Principe 2 : Assurer la lisibilité des thèmes nécessaires à la compréhension du territoire

La brique de symbolisation localement adaptative sera affectée aux thèmes pertinents selon

l'usage visé, afin de garantir une stabilité de lecture de ces thèmes tout au long du continuum. Cette brique peut être affectée aux contours des objets à préserver visuellement ou encore aux halos des toponymes. Elle ne s'applique pas aux éléments de symbolisation définissant le mode de remplissage d'un thème surfacique ou ponctuel, ni aux éléments de symbolisation décrivant l'intérieur des thèmes linéaires.

Principe 3 : Permettre la transition entre deux symbolisations différentes Les briques d'interpolation de symbolisation sont affectées pour permettre de créer un chemin graphique continu lorsque les éléments de symbolisation appariés à partir des symbolisations extrêmes seront différents. Un exemple de transition entre un aplat de couleur et une texture naturelle issue de l'orthophotographie est présenté en figure 4.36. La brique de transparence doit être appliquée à l'aplat pour laisser apparaître la texture naturelle de l'orthophotographie superposée en dessous de l'aplat. De plus, si la couleur de l'aplat est différente de celle de la texture naturelle, une brique d'interpolation de couleur doit être combinée à celle de transparence. La brique de transparence est nécessaire à l'apparition de la texture naturelle tandis que la brique d'interpolation de la couleur est facultative. C'est pourquoi elle est identifiée par un symbole \oplus en figure 4.36).

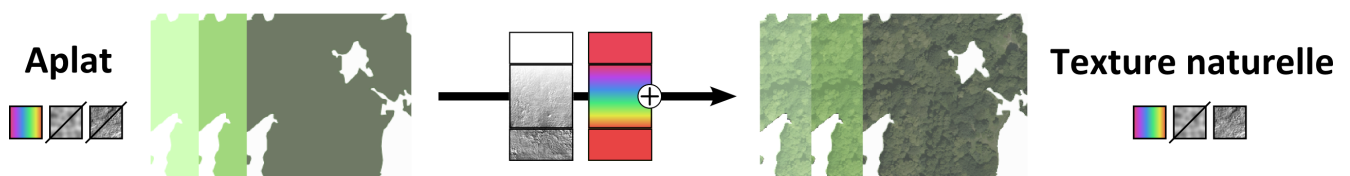


FIGURE 4.36 : Exemple de combinaison de briques pour passer d'un aplat à une texture naturelle

Pour passer d'une symbolisation à une autre, il peut donc être nécessaire d'utiliser plusieurs briques de symbolisation progressive si les symbolisations à relier graphiquement ont plusieurs éléments de symbolisation différents. Le tableau de la figure 4.37 indique les briques de symbolisation utiles pour passer d'une symbolisation de la première colonne à une symbolisation de la première ligne. Certaines briques doivent être utilisées obligatoirement pour obtenir la symbolisation visée, d'autres sont optionnelles (elles sont identifiées par un symbole \oplus dans le tableau de la figure 4.37).

Recommandation : La brique de texturation procédurale est à éviter pour des thèmes surfaciques dont les objets cartographiques sont très petits. En effet, l'utilisation d'une texture procédurale nécessite des surfaces minimales pour que la structure de la texture soit visible et lisible.

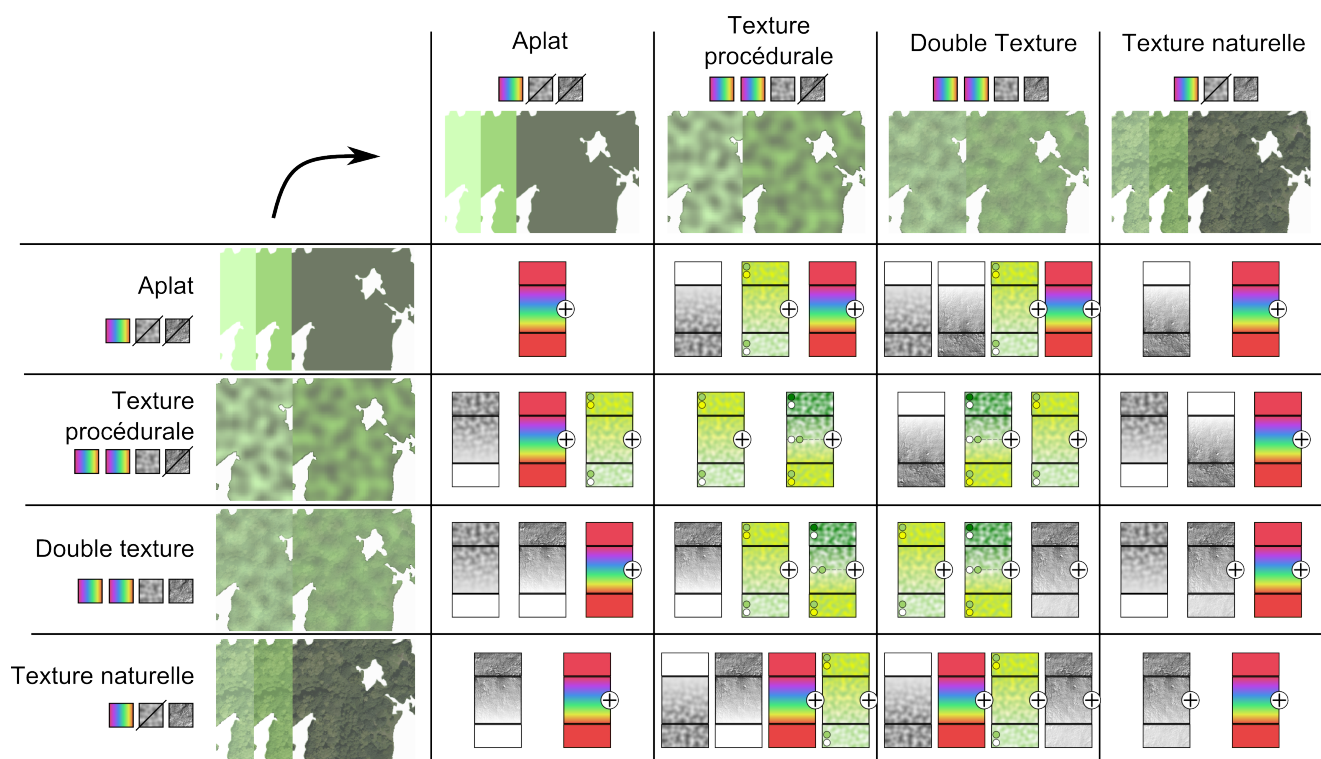


FIGURE 4.37 : Combinaisons de briques

4.2.3.2 Combinaison des briques de symbolisation progressive

Lorsque plusieurs briques doivent être combinées pour passer d'une représentation à l'autre, le concepteur de continuum cartographique doit définir l'ordonnancement d'utilisation de ces briques : quelle brique sera utilisée en premier ou en dernier ? Les deux briques seront-elles utilisées successivement, simultanément, ou avec un chevauchement ?

La figure 4.38 présente des exemples de combinaisons de deux briques (coloration et transparence progressives) permettant de passer d'un aplat vert clair à une symbolisation de texture et couleur naturelles (Le vert extrait de l'orthophotographie lui est superposé par transparence). Les deux premières transitions enchaînent les deux briques successivement, la troisième utilise les deux briques simultanément, et les deux dernières présentent des chevauchements d'utilisation.

Les frises de la figure 4.38 présentent des évolutions ayant des impacts visuels différents. Elles sont ponctuées par des inflexions graphiques plus ou moins fortes. La perception de l'évolution entre deux symbolisations n'est pas nécessairement linéaire selon les différentes combinaisons de briques. En conséquence, l'enjeu pour choisir un ordonnancement est de maîtriser la régularité de l'évolution graphique de la symbolisation perçue suite à l'application des briques de symbolisation. Pour garantir cette régularité, il est nécessaire d'être en capacité de pouvoir ordonner les symbolisations intermédiaires obtenues en accord avec la perception de l'utilisateur.

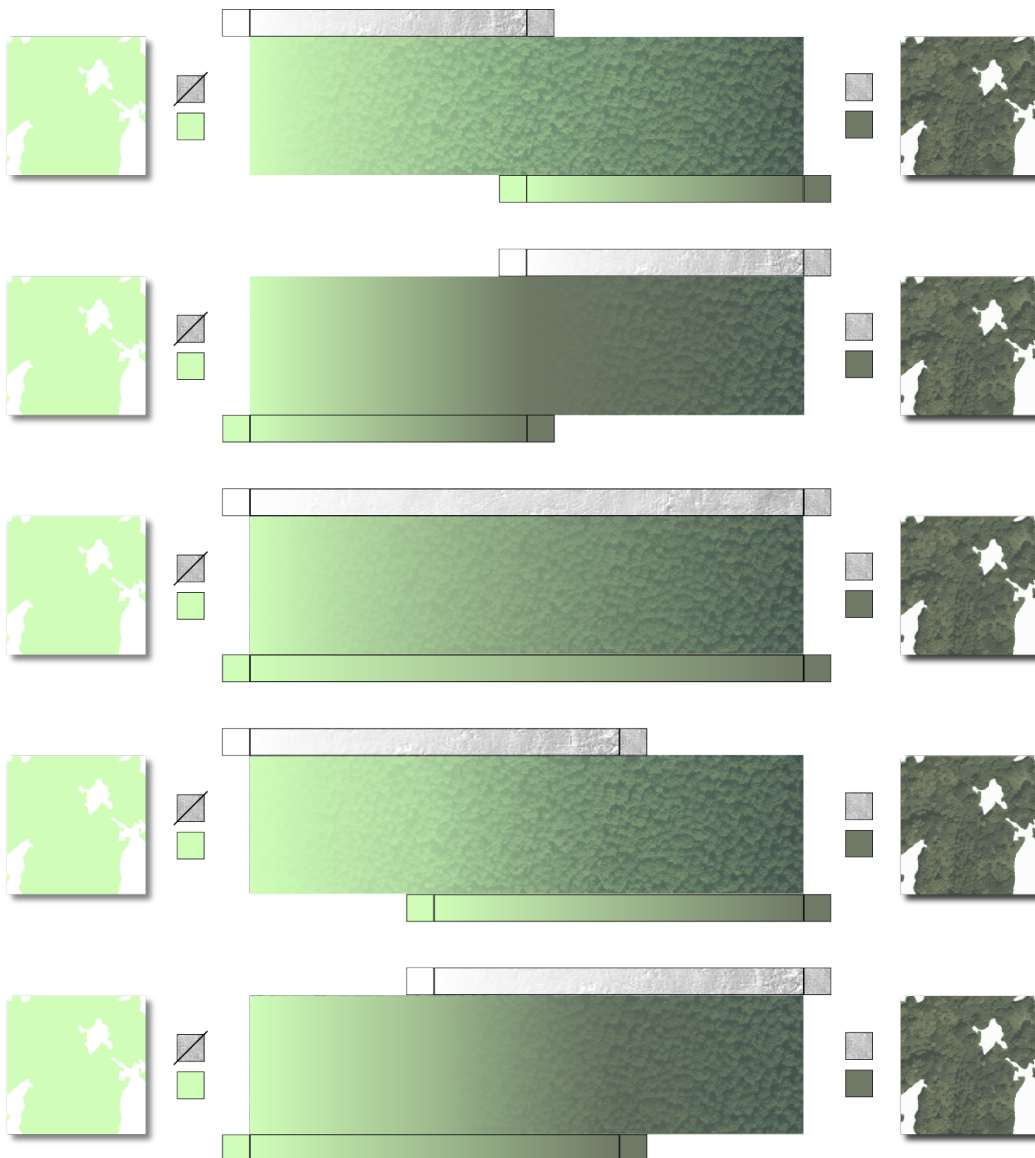


FIGURE 4.38 : Combinaisons possibles des briques de coloration et de transparence progressives

4.2.3.3 Synchronisation des thèmes cartographiques

La dernière étape de création d'un continuum cartographique consiste à coordonner l'ensemble des thèmes entre eux. Pour cela, il s'agit de préserver la qualité cartographique de chaque représentation cartographique intermédiaire en garantissant que les règles de cartographie soient respectées, mais aussi en assurant une homogénéité graphique globale. En effet, l'utilisation de briques d'interpolation de symbolisations permet de créer un grand nombre de symbolisations perçues pour chaque thème, il convient donc de faire en sorte que l'ensemble des thèmes évolue simultanément pour créer des représentations cartographiques homogènes. Si les deux extrémités choisies sont plus ou moins réalistes, abstraites, topographiques, artistiques, etc., alors cette caractéristique stylistique devra évoluer simultanément pour les différents thèmes cartographiques. L'enjeu est de fournir à l'utilisateur une représentation cartographique de qualité à chaque étape du continuum. La figure 4.39 présente deux exemples de représentations cartographiques dont un

des thèmes (la végétation) est symbolisé avec un degré de réalisme ou d'abstraction totalement différent de celui des autres thèmes de la représentation. Ces représentations cartographiques constituent des exemples à éviter si l'on souhaite faire évoluer tous les thèmes avec un degré de réalisme ou d'abstraction similaire. En effet, dans ces représentations, la végétation a évolué indépendamment des autres thèmes cartographiques. Elle est trop abstraite par rapport au reste de la représentation dans l'image de gauche de la figure 4.39, et trop réaliste par rapport au reste de la représentation dans l'image de droite de la figure 4.39.



FIGURE 4.39 : Représentations cartographiques présentant des symbolisations non homogènes en terme de degré de réalisme et d'abstraction.

Tout d'abord, il est important de noter que la coordination des thèmes cartographiques constituant l'ensemble des représentations cartographiques du continuum en devenir ne se substitue pas à la définition de l'ordre de superposition de ces thèmes au sein de chaque représentation cartographique intermédiaire. En effet, cet ordre de superposition est défini en amont pour les représentations cartographiques extrêmes, décrit par le SLD de ces extrémités et ré-utilisé pour les représentations intermédiaires. La coordination des symbolisations perçues prend donc en compte cet ordre de superposition prédéfini comme un paramètre en entrée et n'a pas vocation à le modifier.

Par ailleurs, contrairement aux autres étapes de constitution d'un continuum cartographique, la coordination des thèmes ne participe pas à l'extension de l'espace des possibles cartographiques. Au contraire, elle réduit le nombre de représentations cartographiques intermédiaires acceptables en ajoutant une contrainte de conception. Le positionnement de la représentation cartographique intermédiaire au sein du continuum permettra de définir des plages acceptables pour les symbolisations perçues de chaque thème la constituant.

Enfin, de même que pour la combinaison de plusieurs briques pour symboliser un thème cartographique au long du continuum, cette étape de coordination implique de pouvoir ordonner les représentations de chaque thème selon la perception de l'utilisateur. De plus, il est nécessaire de pouvoir établir des points de correspondance entre les différents thèmes, en prenant également en compte la perception de l'utilisateur.

4.3 Test utilisateur pour le paramétrage des briques de symbolisation progressive

L'utilisation de briques d'interpolation de symbolisations permet de créer un grand nombre de représentations cartographiques intermédiaires. Choisir un chemin parmi ces représentations cartographiques intermédiaires nécessite de pouvoir ordonner les symbolisations. L'existence d'un critère ou d'une mesure permettant d'ordonner les symbolisations permet en effet de choisir les briques de symbolisation pour créer des transitions, de déterminer leur ordre de déclenchement et de les synchroniser. C'est pourquoi, dans notre contexte de construction d'un continuum cartographique entre une carte topographique et une orthophotographie, nous souhaitons évaluer le degré de réalisme et d'abstraction perçu par les utilisateurs, afin d'en assurer une évolution régulière. Pour cela, nous avons réalisé un test utilisateur visant à évaluer les degrés de réalisme et d'abstraction perçus par l'utilisateur à la consultation de différentes symbolisations. Ce test utilisateur a été diffusé sur Internet pendant trois mois (du 1^{er} Juillet au 30 Septembre 2014) sous la forme d'un questionnaire interactif non supervisé. Le panel des participants est constitué de 462 personnes différentes, dont 311 ont répondu à l'intégralité du test. Nous présentons ici les résultats obtenus à partir de l'analyse de ces 311 réponses complètes.

Le protocole de test est détaillé en annexe C, ainsi qu'une analyse détaillée des réponses des participants. Nous présentons ici un portrait synthétique des participants selon leur usage de cartes topographiques et des orthophotographies en figure 4.40 puis exploitons les résultats pour guider le paramétrage de nos briques de symbolisation. La figure 4.40 présente une analyse combinée des usages de cartes et de photos, dans laquelle chaque région est proportionnelle aux nombres de participants des catégories en ligne et en colonne correspondantes. Chaque case représente 1% des participants ayant répondu à l'ensemble du test. Par exemple, 4 des participants ont répondu ne pas utiliser de carte et utiliser des orthophotographies pour un usage de loisir ; cette catégorie de participants est illustrée par la région violet clair de la colonne de gauche et la ligne du bas. Les différents usages de carte topographique sont distingués par des teintes différentes (jaune, vert, bleu, violet), tandis que les différents usages de photos aériennes sont différenciés par des couleurs plus ou moins claires ou foncées.

Le groupe de participants le plus important (en bleu moyennement foncé) est celui qui utilise des cartes topographiques et des photos aériennes pour des usages de loisirs et professionnel. Ce constat et l'analyse complète du profil des participants présentée en annexe C nous permettent de conclure que notre panel de participants est représentatif d'un public plutôt accoutumé à l'usage de représentation cartographique ou d'orthophotographie (seulement 5% des participants répondent qu'ils n'utilisent ni carte ni orthophotographie). De plus, ces analyses attestent d'une grande variété d'usages parmi les participants à notre test.

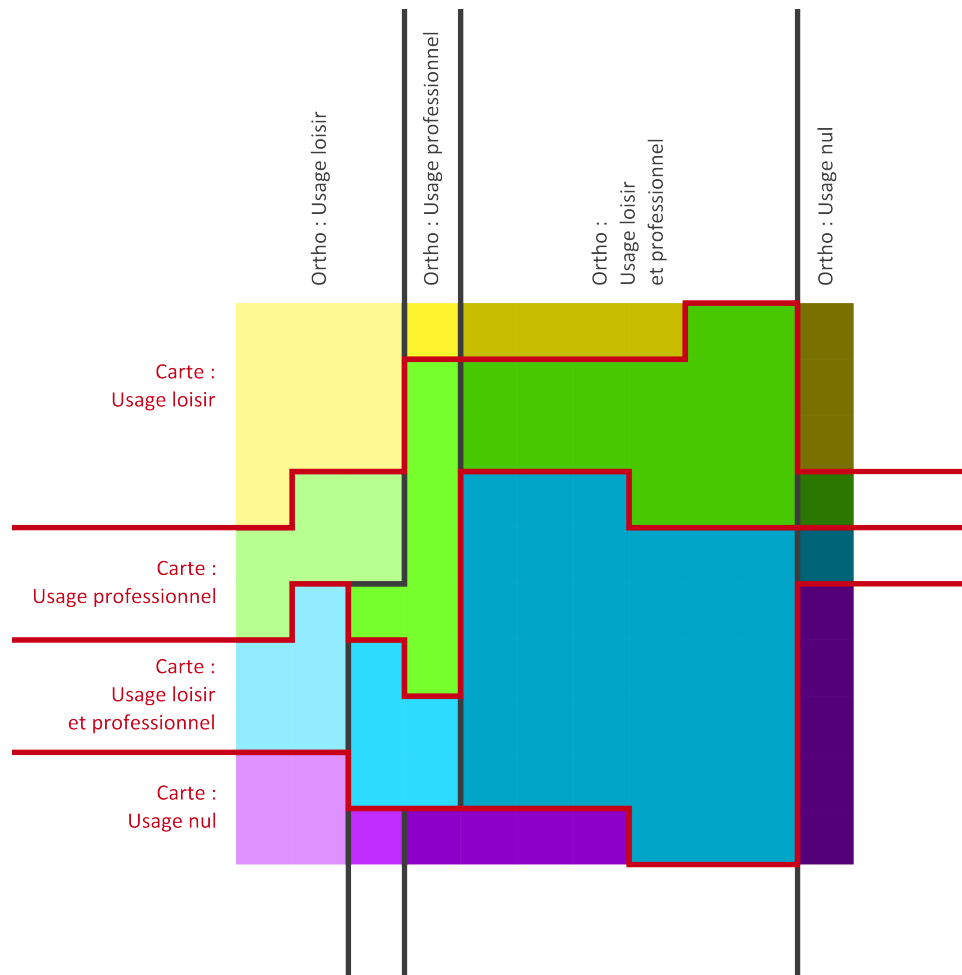


FIGURE 4.40 : Usage de cartes et de photos aériennes

4.3.1 Ordonnement des symbolisations selon leur degré de photoréalisme

L'objectif général est de pouvoir gérer pour chaque thème la régularité du degré de réalisme au sein d'un continuum et pour chaque thème cartographique. En conséquence, notre test utilisateur vise à vérifier l'existence d'un degré de photoréalisme perçu partagé par l'ensemble des utilisateurs. La confirmation de cette hypothèse permettrait d'utiliser ce degré de photoréalisme pour ordonner les symbolisations perçues et naviguer de l'une à l'autre en utilisant une brique de symbolisation progressive en vue de former un chemin graphique progressif.

Pour vérifier notre hypothèse, notre test utilisateur s'appuie sur un panel de symbolisations associées à des données représentant la forêt, présentées en figure 4.41. Ce panel d'échantillons est constitué de symbolisations différemment colorées et texturées : chaque colonne présente une couleur principale similaire et chaque ligne un type de texture similaire. La dernière colonne présente des symbolisations réalisées avec une couleur totalement abstraite pour représenter une forêt. L'objectif est de décorréler la perception du degré de réalisme due à la couleur de celle due à la texture. La dernière symbolisation est un extrait d'orthophotographie, présenté dans le test comme un objectif de photoréalisme maximal.

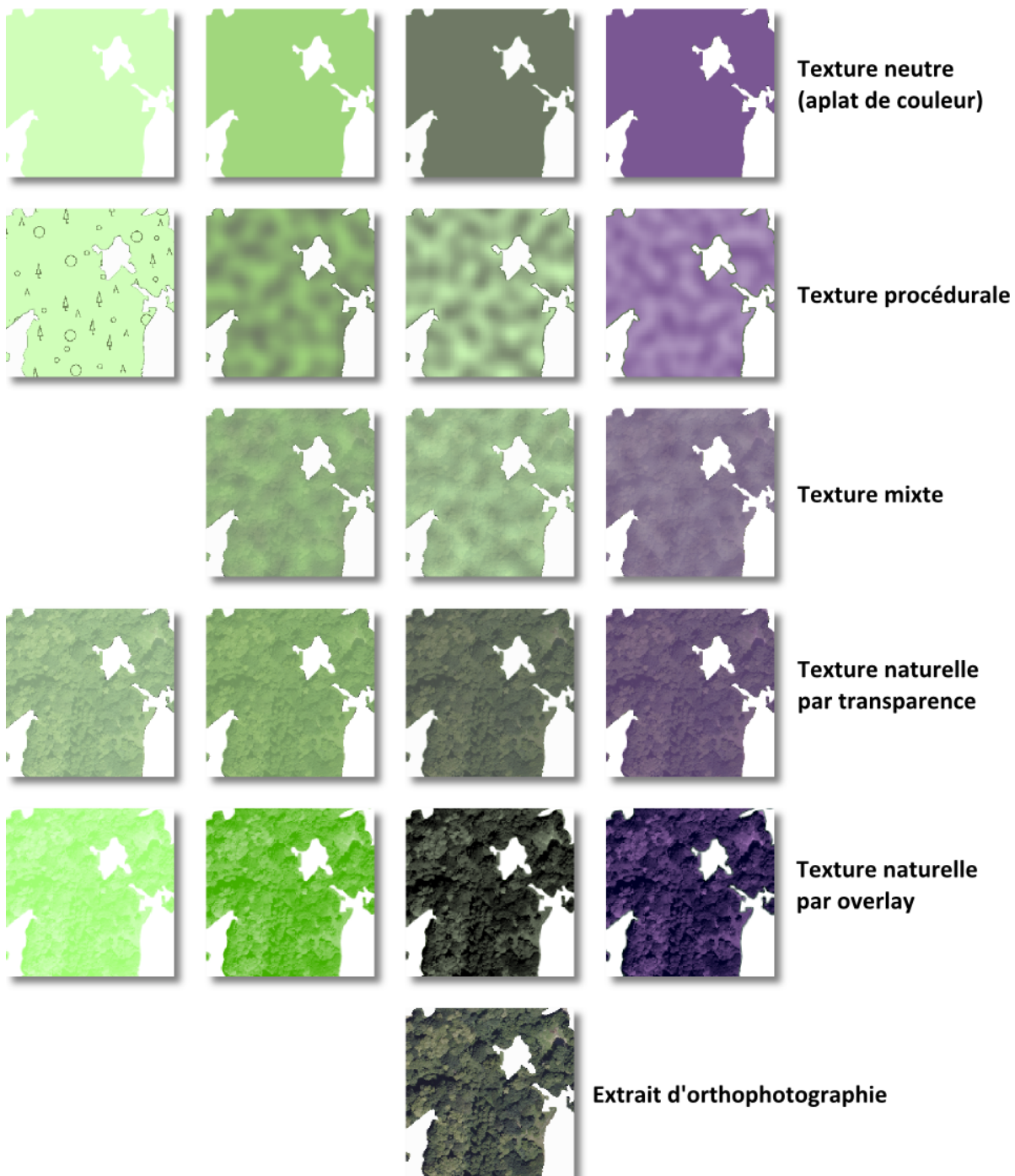


FIGURE 4.41 : Supports visuels du test utilisateur : échantillons de symbolisations perçues.

Différentes questions du test utilisateur permettent d'évaluer le degré de photoréalisme des symbolisations du panel de la figure 4.41 afin de confronter les résultats obtenus par des protocoles expérimentaux différents. L'utilisateur est amené au cours du test à estimer un degré de photoréalisme, à ordonner des symbolisations ou encore à choisir entre deux symbolisations. Ainsi, les symbolisations sont qualifiées individuellement ou relativement, en comparaison les unes des autres.

Pour chaque symbolisation perçue individuellement Une des tâches expérimentales réalisées par les participants consiste à qualifier le degré de photoréalisme de chaque symbolisation, en utilisant un curseur. La valeur du curseur varie de 0 à 100 avec un pas de 5, mais le curseur n'est pas gradué, l'utilisateur a juste pour indication que le degré de photoréalisme varie entre 0 et l'objectif de photoréalisme maximal représenté par l'orthophotographie (Cf. question 2 dans le protocole décrit en annexe C).

En figure 4.42, les échantillons qualifiés par ce protocole sont positionnés sur un axe horizontal de photoréalisme selon la valeur moyenne de l'ensemble des participants. Le positionnement vertical des symbolisations n'a pas de signification, il permet simplement d'observer les symbolisations sans qu'elles se recouvrent.

Le type de texture naturelle apparaît comme un facteur déterminant pour faire varier le degré de photoréalisme : la texture naturelle est clairement un gage d'augmentation du degré de photoréalisme, tandis que les textures procédurales et mixtes sont qualifiées comme étant quasiment aussi abstraites que les aplats. Au sein d'une catégorie de texture, les représentations sont ordonnées selon leur couleur. La couleur apparaît donc comme une variable visuelle complémentaire et secondaire à la texture pour déterminer le degré de photoréalisme d'une symbolisation.

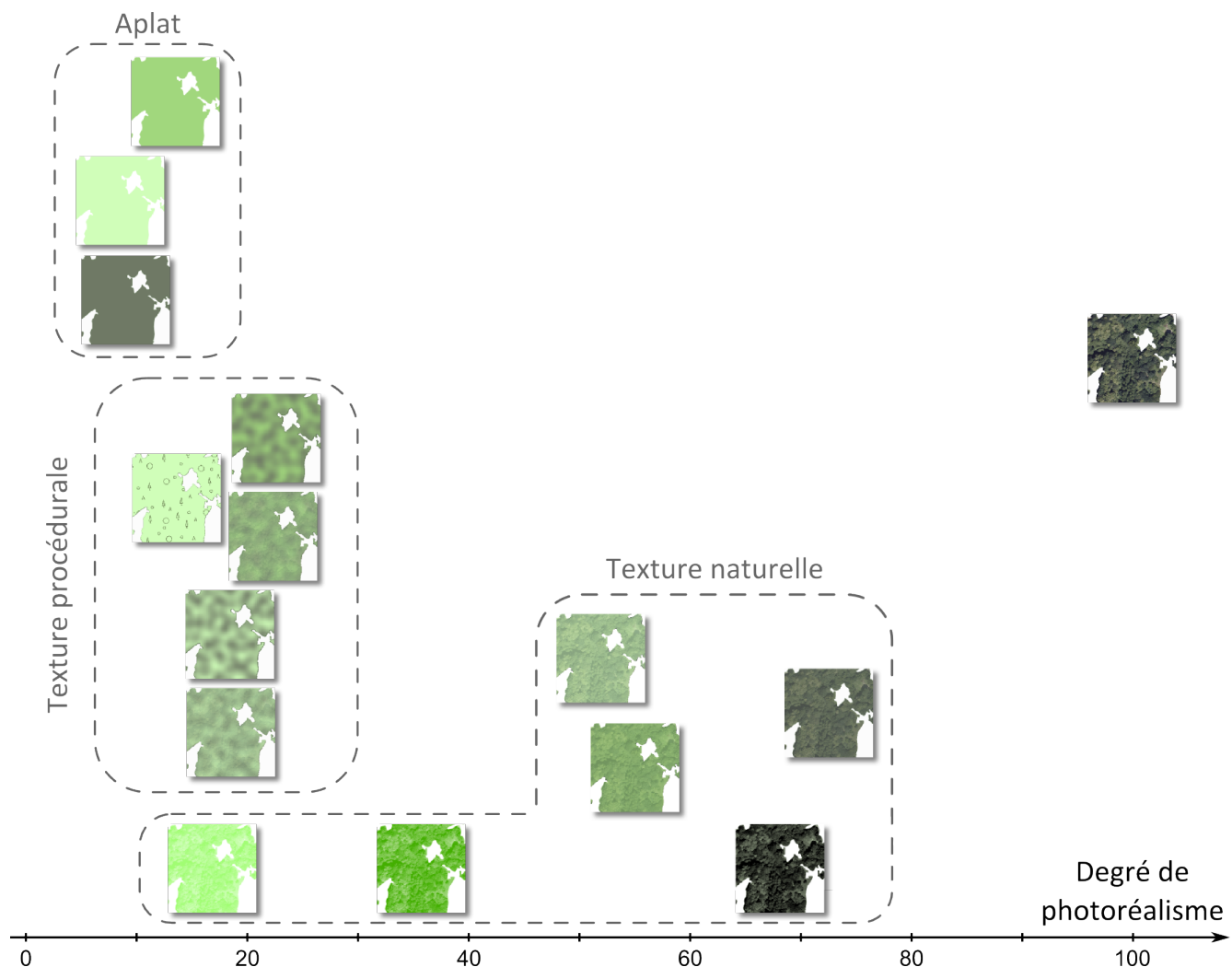


FIGURE 4.42 : Moyennes des degrés de photoréalisme estimés par les participants.

La figure 4.43 présente les écart-types des réponses des participants pour chaque symbolisation. Ces indicateurs statistiques indiquent une variabilité égale pour les différentes symbolisations. Cette variabilité peut sembler forte au premier abord pour les symbolisations ayant une moyenne de degré de réalisme du même ordre de grandeur (c'est-à-dire les aplats, les textures procédurales et les textures mixtes). Cependant, l'analyse des histogrammes correspondants (présentés en annexe C) nous permet de conclure à l'existence d'un degré de photoréalisme partagé.

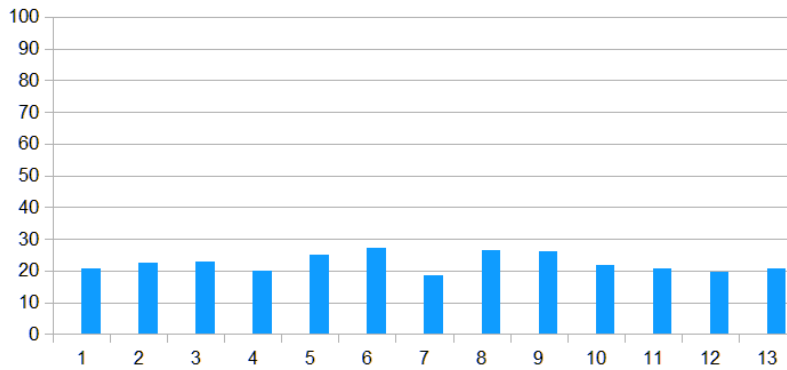


FIGURE 4.43 : Ecart-types des réponses des participants

Degrés de réalisme relatifs entre symbolisations perçues Les curseurs de qualification du degré de photoréalisme sont tous présentés sur une même page du test utilisateur. L'utilisateur est donc en capacité d'assurer une certaine cohérence entre les degrés de réalisme individuels des symbolisations analysées. En conséquence, nous avons analysé les degrés de réalisme deux à deux pour déterminer s'il existe un ordre complet entre les symbolisations analysées. Pour cela, nous avons calculé les différences entre les degrés de réalisme estimés en considérant les symbolisations deux à deux. Puis nous avons dénombré le nombre de participants ayant qualifié une représentation donnée comme moins réaliste qu'une autre.

Le premier tableau de la figure 4.44 présente le pourcentage des participants ayant qualifié les symbolisations en ligne avec un degré de photoréalisme plus fort que celui des symbolisations correspondantes en colonne. Lorsqu'une majorité de participants a qualifié la symbolisation en ligne avec un degré plus fort que celui de la symbolisation correspondante en colonne, le pourcentage indiqué est supérieur à 50% et a été surligné en vert. Dans le cas contraire, le pourcentage a été surligné en jaune. Par exemple, 20% de participants seulement ont attribué un degré de réalisme plus fort à la symbolisation n° 1 qu'à la symbolisation n° 5 (Cf. case ligne 1 colonne 5). Cela indique qu'une majorité de participants qualifie la symbolisation n° 1 comme étant moins photoréaliste que la n° 5. Dans ce premier tableau, les représentations ne sont pas classées a priori. Elles sont représentées dans l'ordre dans lequel elles étaient disponibles durant le test utilisateur, choisi aléatoirement pour ne pas influencer l'utilisateur par un ordre pré-établi selon des critères arbitraires.

Ce tableau a été analysé par la méthode des matrices de Bertin [Bertin, 1977]. Après plusieurs tringlages et détringlages (manipulations consistant à modifier l'ordre des lignes et des colonnes), nous obtenons le deuxième tableau de la figure 4.44. Ce résultat nous permet de classer les symbolisations proposées de la moins photoréaliste à la plus photoréaliste par comparaison des degrés de photoréalismes relatifs.

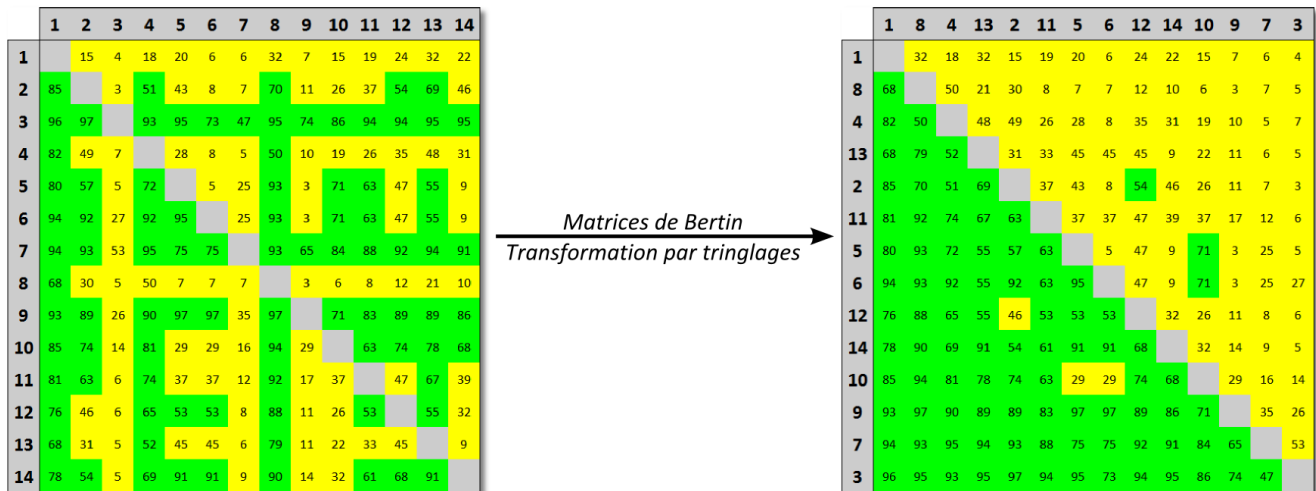


FIGURE 4.44 : Analyse des résultats selon la méthode des matrices de Bertin : Ordonnement des symbolisations selon la part en pourcentage des estimations positives de degré de photoréalisme relatif par les participants.

Le deuxième tableau de la figure 4.44 présente un ordre total, à quelques exceptions près. Ainsi, il permet de déterminer un classement partiel entre les symbolisations centrales. Ce classement comporte quelques relations cycliques constituant les exceptions à l'ordre total. Par exemple, la symbolisation 10 a été plus souvent qualifiée avec un degré de photoréalisme plus faible que la symbolisation 5 et 6, elles-mêmes plus souvent qualifiées avec un degré de photoréalisme plus faible que les symbolisations 12 et 14, elles-mêmes plus souvent qualifiées avec un degré de photoréalisme plus faible que la symbolisation 10. Le nombre de relations cycliques de ce type a été minimisé le plus possible par les opérations de tringlages et détringlages. Le résultat obtenu dans le deuxième tableau de la figure 4.44 confirme l'existence d'un degré de photoréalisme partagé par une majorité de participants permettant d'ordonner les symbolisations présentées selon ce degré de perception.

En conséquence, nous identifions les trois groupes de la figure 4.45 : celui des symbolisations les moins photoréalistes, celui des symbolisations les plus photoréalistes et un groupe intermédiaire regroupant les symbolisations ayant des relations cycliques qui ont été mises en évidence par un contour noir. Les symbolisations des deux groupes extrêmes sont donc ordonnées selon un ordre total, et les autres sont classées au mieux au vu de l'analyse par la méthode des matrices de Bertin. De même que pour l'analyse individuelle des symbolisations, la texture apparaît comme un facteur déterminant pour déterminer le degré de photoréalisme perçu d'une symbolisation relativement à une autre. En effet, le groupe des symbolisations les moins photoréalistes est composé de symbolisations en aplat et d'une trame de poncifs très abstraite tandis que le groupe des représentations les plus photoréalistes est constitué de symbolisations laissant apparaître par transparence une texture naturelle issue de l'orthophotographie. De plus dans le groupe intermédiaire, ce sont les symbolisations utilisant une texture procédurale qui sont potentiellement moins photoréalistes que celles présentant une texture naturelle par transparence ou mode overlay.

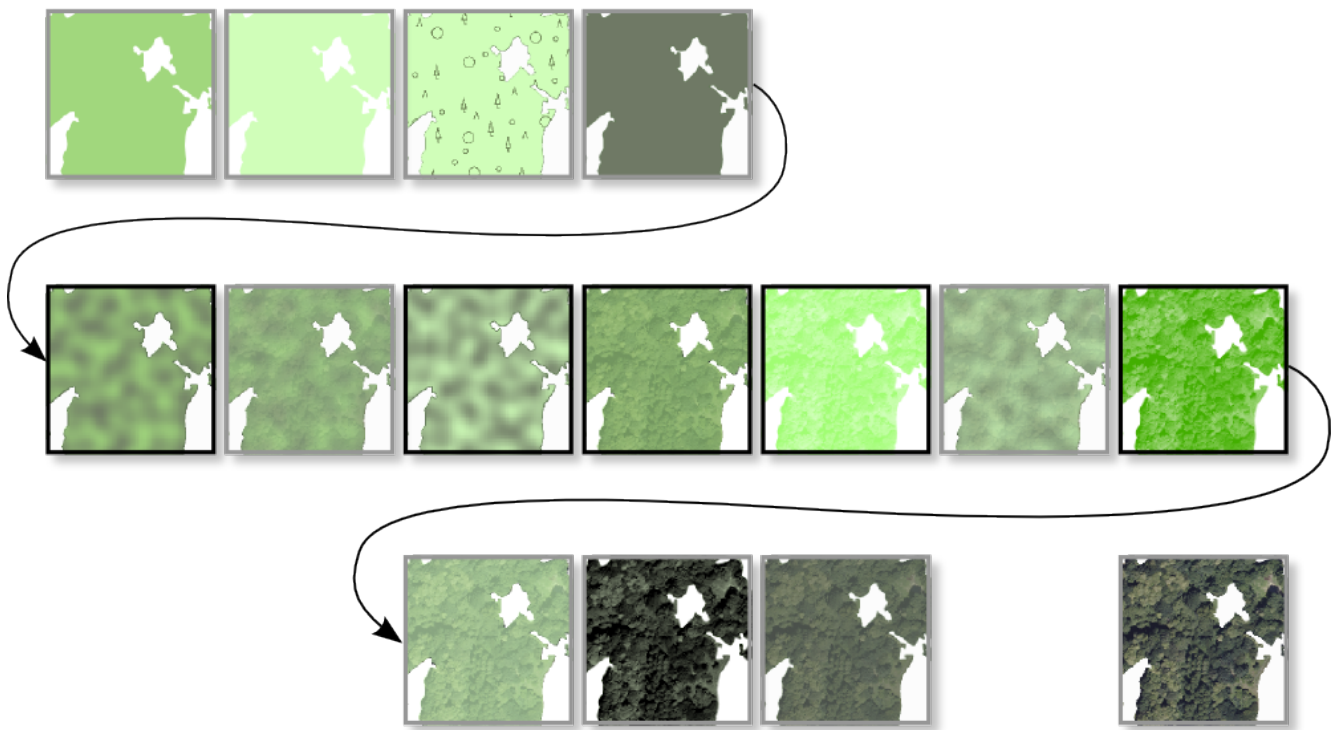


FIGURE 4.45 : Ordonnancement des symbolisations selon un degré de photoréalisme partagé issu de l'analyse par matrice de Bertin présentée en figure 4.44.

Pour des couples de symbolisations perçues Afin de confirmer expérimentalement les différences de degré de photoréalisme entre différents types de symbolisation, onze couples de symbolisations ont été présentés successivement aux participants qui devaient sélectionner parmi ces deux symbolisations celle qui leur paraissait être la plus photoréaliste (Cf. question 4 dans le protocole décrit en annexe C).

L'objectif est de décorrélérer les facteurs d'augmentation du degré de photoréalisme des symbolisations présentées. Pour cela, les symbolisations proposées en comparaison ont certains éléments similaires et certains paramètres différents. Ainsi, des couples de symbolisations ont été construits pour confronter différents modes de transparence (classique et overlay), pour confronter différentes textures perçues (naturelle ou procédurale), etc. Plusieurs couples ont également été proposés dans une couleur abstraite (le violet), en vue de confronter les différents modes de transparence ou les différentes textures perçues indépendamment de la couleur. De même, des symbolisations en aplats colorés ont été confrontées pour juger de l'impact de la couleur indépendamment de la texture. Enfin, certains éléments de symbolisation ont été combinés pour juger de l'influence d'un élément sur l'autre. Notamment, l'apport de texture naturelle par transparence sur une texture procédurale, ou inversement l'apport d'une texture procédurale sur une texture naturelle par transparence ont été étudiés pour déterminer si les effets photoréalistes produits par les différents éléments de symbolisations sont plus efficaces lorsqu'ils sont utilisés conjointement.

La figure 4.46 présente les proportions de participants ayant sélectionné la symbolisation de gauche en orange et la symbolisation de droite en bleu. Les symbolisations sont accompagnées d'images schématiques représentant leur(s) couleur(s) et leur(s) texture(s). Un premier constat est que, dans l'ensemble, les résultats sont plutôt consensuels : mis à part pour le premier couple présentant deux aplats, il y a toujours une majorité de participants qui choisit la même représentation au sein des autres couples. Cela conforte notre constat d'existence d'un degré de photoréalisme perçu partagé. De plus, cela renforce l'idée que c'est la texture qui est un facteur déterminant dans l'appréciation du degré de photoréalisme. En effet, dès que les couples présentent des textures différentes, une majorité de participants choisira l'une ou l'autre des symbolisations.

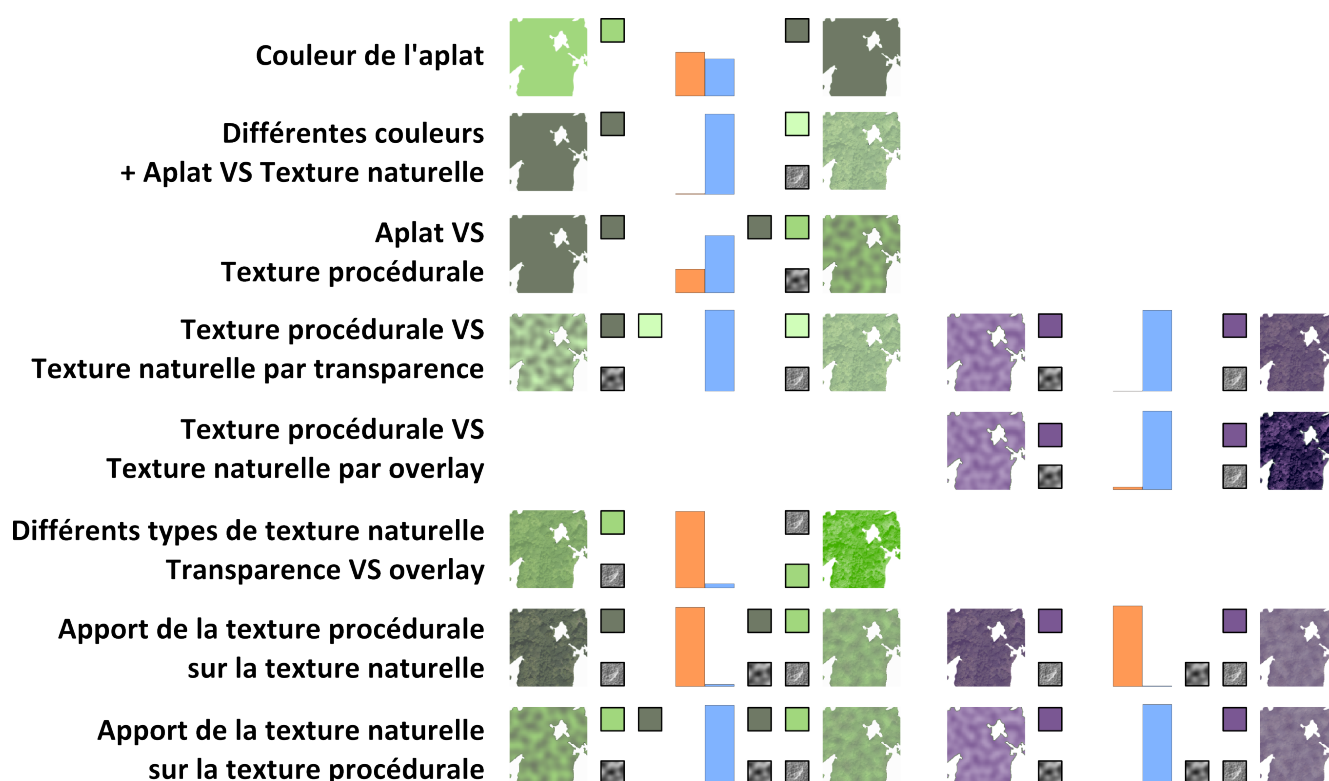


FIGURE 4.46 : Comparaison de couples de symbolisation : sélection de la symbolisation la plus photoréaliste par les participants (en orange pour la sélection de gauche, et en bleu pour la sélection de droite).

De plus, si l'on reprend les catégories de textures identifiées en figure 4.42, tous les résultats de comparaison de couples de symbolisations confortent l'organisation de ces catégories selon un degré de photoréalisme. Cette organisation est présentée en figure 4.47 dans laquelle chaque lien a été confirmé par les résultats d'un ou plusieurs couples de symbolisation. La texture est donc bien déterminante pour définir le degré de photoréalisme d'une symbolisation. On observe également que l'effet photoréaliste produit par certains éléments de symbolisation ne s'additionne pas lorsqu'ils sont utilisés conjointement. En effet, les symbolisations présentant une texture mixte (procédurale et naturelle) sont jugées comme étant moins réalistes que les symbolisations présentant uniquement une texture naturelle.

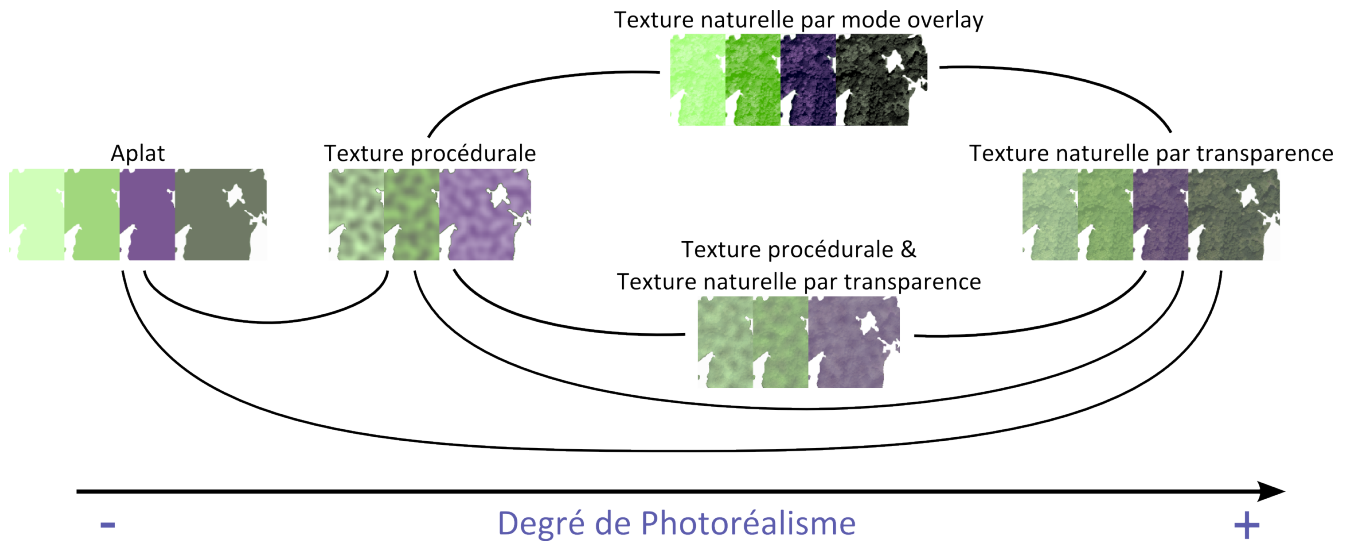


FIGURE 4.47 : Ordonnement des symbolisations selon un degré de photoréalisme

Ordonnement de symbolisations perçues Enfin, toujours pour confirmer l'ordonnement des symbolisations perçues selon un degré de photoréalisme partagé, cinq symbolisations représentatives des différentes catégories de textures ont été présentées à l'utilisateur : une trame de poncifs géométriques, une texture procédurale, une texture naturelle par mode overlay avec une couleur vert clair, une texture naturelle obtenue par transparence avec un vert moyen et un aplat de couleur naturelle extraite de l'orthophotographie. L'utilisateur devait les ordonner interactivement en les positionnant dans cinq cases pour former un continuum de symbolisations entre deux extrémités fixées, l'une très abstraite (un aplat vert clair), l'autre totalement photoréaliste (un extrait d'orthophoto) (Cf. question 3 dans le protocole décrit en annexe C).

La figure 4.48 présente pour chaque symbolisation la part des utilisateurs qui a placé cette symbolisation dans les différentes positions du continuum à construire. Il apparaît que toutes les symbolisations n'ont pas toujours été ordonnées avec autant de consensus. Par exemple, la symbolisation de texture naturelle par vert clair transparent a été positionnée à 90% en cinquième position tandis que la symbolisation de texture procédurale a été positionnée par un tiers environ des participants en troisième position, par un tiers environ des participants en quatrième position et par un tiers environ des participants aux autres positions. Cependant, chaque symbolisation présente un pic désignant la position où elle a été le plus souvent positionnée.

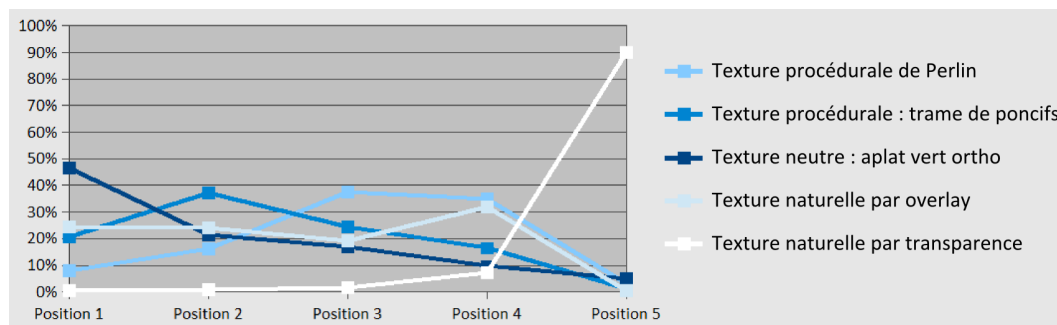


FIGURE 4.48 : Ordonnement des symbolisations par les participants.

Ces résultats nous permettent de reconstruire ce que nous appelons un **continuum majoritaire**, dans lequel chaque symbolisation se trouve là où elle a été positionnée par le plus de participants. Ce continuum majoritaire, présenté en figure 4.49, correspond également au continuum qui a été le plus de fois créé par les participants du test (soit 17%) de notre panel. Il est donc majoritaire à double titre.

Ce continuum confirme une fois de plus l'ensemble des résultats précédents concernant le degré de photoréalisme. Il apparaît clairement que la couleur principale des symbolisations, pourtant bien différentes, n'est pas un facteur déterminant pour les participants lorsqu'ils doivent les ordonner selon leur degré de photoréalisme comme ça leur était indiqué dans la question et suggéré par les extrémités fixées. C'est bien la texture qui évolue le long de ce continuum majoritaire, allant de l'aplat à une texture naturelle en passant par une trame de poncifs géométriques abstraite et une texture procédurale.

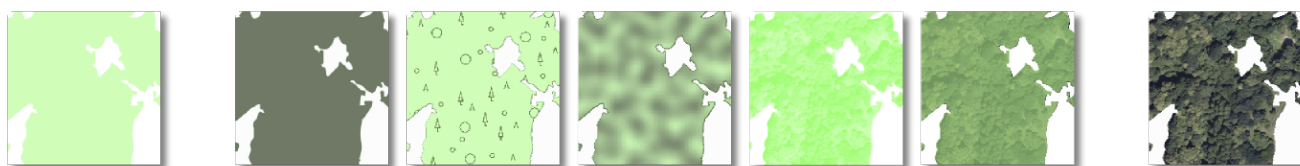


FIGURE 4.49 : Continuum majoritaire créé par les utilisateurs.

La première partie de notre test utilisateur nous permet d'affirmer que notre hypothèse de travail est vérifiée : différentes symbolisations cartographiques peuvent être ordonnées selon un **degré de photoréalisme perçu partagé** par un panel varié d'utilisateurs. De plus, pour déterminer le degré de photoréalisme d'une symbolisation perçue, **la texture est un facteur déterminant**. Plus la texture est abstraite (aplat ou trame de poncifs géométriques) plus le degré de photoréalisme sera faible. Inversement plus la texture est naturelle (issue de l'orthophoto) plus le degré de photoréalisme est fort. Enfin, l'utilisation de textures procédurales apparaît comme un moyen graphique pertinent pour créer des états intermédiaires entre une texture abstraite et une texture naturelle.

4.3.2 Déclenchement des briques pour passer d'une représentation à l'autre

Un deuxième objectif du test utilisateur était de déterminer des chemins de passage entre symbolisations différentes. Pour cela, l'utilisateur est amené à choisir une symbolisation intermédiaire entre deux autres symbolisations ayant deux éléments de symbolisation différents (Cf. question 5 dans le protocole décrit en annexe C). L'objectif est de déterminer s'il est plus pertinent de faire d'abord varier l'un ou l'autre des éléments de symbolisation. Notre approche est donc de chercher la meilleure symbolisation pivot pour déterminer l'ordre des briques d'interpolation de symbolisations à utiliser.

Par exemple, pour déterminer comment passer d'un aplat vert clair à une symbolisation vert foncée laissant apparaître la texture naturelle de l'orthophoto par transparence, nous proposons à l'utilisateur de choisir entre une symbolisation vert clair laissant apparaître la texture naturelle par transparence et un aplat vert foncé. Comme l'illustre la figure 4.50, nous interprétons ensuite ce résultat pour choisir entre deux combinaisons possibles parmi celles présentées en figure

4.38. Si une majorité d'utilisateurs choisit la symbolisation vert clair avec texture naturelle, nous déduisons qu'il faut utiliser la combinaison en haut de la figure 4.50. Inversement, si une majorité d'utilisateurs choisit la symbolisation en aplat vert foncé, alors nous déduisons qu'il faut utiliser la combinaison en bas de la figure 4.50.

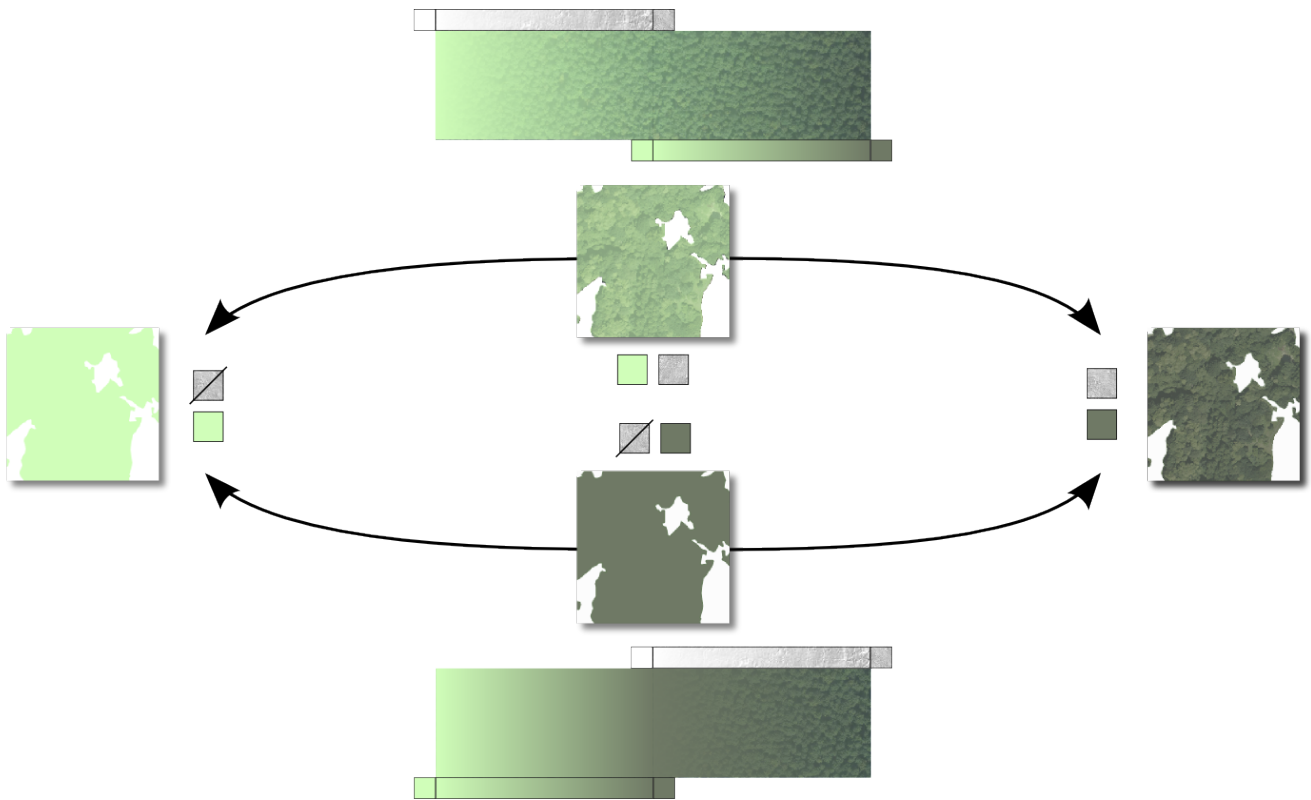


FIGURE 4.50 : Création d'un chemin graphique par le choix d'une symbolisation pivot.

Six chemins graphiques ont ainsi été construits par l'utilisateur afin de déterminer comment combiner deux à deux les briques d'interpolation de la couleur d'un aplat, de coloration d'une texture procédurale, de texturation procédurale ou de transparence. Chaque chemin a été analysé doublement, tout d'abord avec des couleurs réalistes, puis dans une version poussée à l'extrême avec une couleur totalement abstraite pour une forêt, le violet. L'objectif était là aussi de guider l'utilisateur en l'aidant à décorrélérer les facteurs de texture et de couleur.

La figure 4.51 présente les six chemins proposés à l'utilisateur avec en miroir les versions en couleurs réalistes et les versions poussées à l'extrême. Les symbolisations pivot à sélectionner sont présentées entre les extrémités des chemins à construire, avec les briques d'interpolation correspondante pour naviguer entre les extrémités en passant par ces symbolisations pivots. L'utilisateur, lui, n'avait à sa disposition que les extrémités et les deux possibilités de symbolisation pivot. Il ne disposait pas d'information concernant l'utilisation de briques d'interpolation pour créer des transitions continues. Les réponses majoritaires ont été entourées en bleu en figure 4.51 et les parts des participants ayant choisi cette symbolisation sont indiquées dans le tableau 4.52.

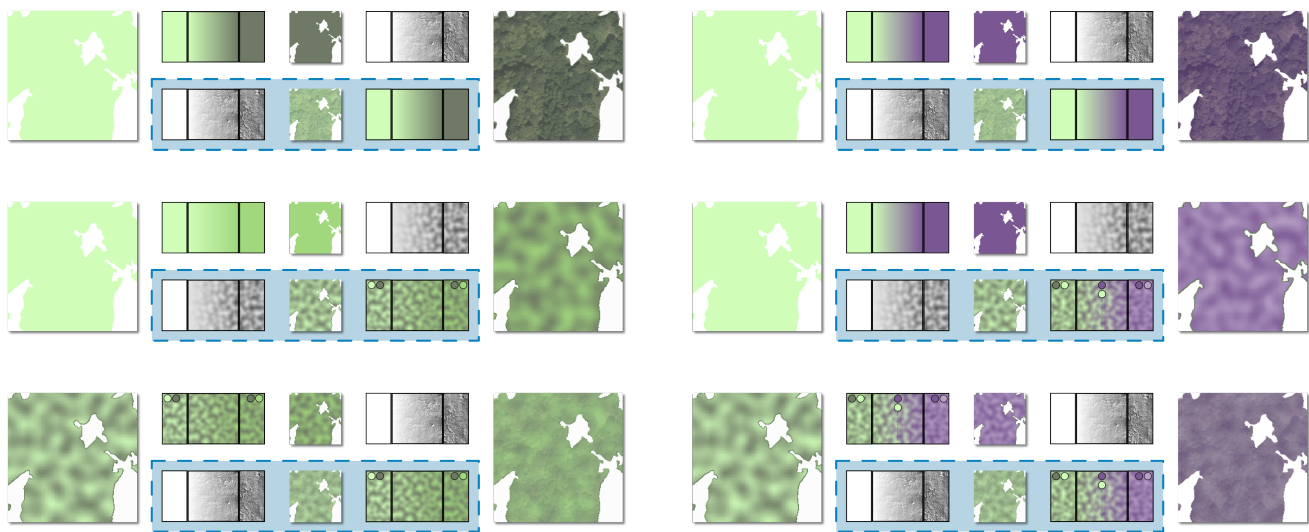


FIGURE 4.51 : Symbolisations pivots sélectionnées (entourées en bleu) par les participants pour créer six chemins graphiques.

	Couleurs réalistes	Couleurs abstraites
De l'aplat à la texture naturelle	93 %	83 %
De l'aplat à la texture procédurale	53 %	72 %
De la texture procédurale à la texture mixte	88 %	92 %

FIGURE 4.52 : Part des participants ayant choisi la symbolisation pivot entourée en bleu en figure 4.51

Tout d'abord, notons que la plupart des chemins sont construits de la même manière par la grande majorité des participants. Cela légitime notre approche d'utilisation d'un consensus sur la perception d'un degré de photoréalisme comme aide au paramétrage pour la création d'un continuum cartographique.

Il apparaît clairement que toutes les symbolisations pivots choisies par les utilisateurs (entourées en bleu en figure 4.51) sont celles qui présentaient une texture plus réaliste : entre un aplat et une texture naturelle ou procédurale, la symbolisation pivot majoritairement choisie sera texturée, et entre une texture procédurale et une texture mixte, la symbolisation pivot majoritairement choisie présente une texture mixte (procédurale et naturelle par transparence).

En conséquence, pour créer un chemin graphique d'une symbolisation abstraite à une symbolisation réaliste, la brique de texturation progressive (procédurale ou naturelle) sera utilisée en premier, avant la brique de coloration progressive. Inversement, l'effet de texture sera d'abord conservé pour créer un chemin graphique allant d'une symbolisation progressive à une symbolisation abstraite.

Enfin, l'analyse des chemins sélectionnés par les participants au regard des degrés de photoréalisme estimés (Cf. figure 4.42) comme illustré en figure 4.53 (en trait continu, tandis que ceux qui n'ont pas été retenus sont représentés en pointillés) indique que les utilisateurs privilégient des chemins au sein desquels le degré de photoréalisme évolue progressivement. En effet, si on compare les deux chemins proposés entre un aplat vert clair et une symbolisation de texture naturelle et de couleur issue de l'orthophoto (en violet sur la figure 4.53), il est clair que la

symbolisation pivot choisie par la majorité des participants est plus centrale en terme de degré de photoréalisme.

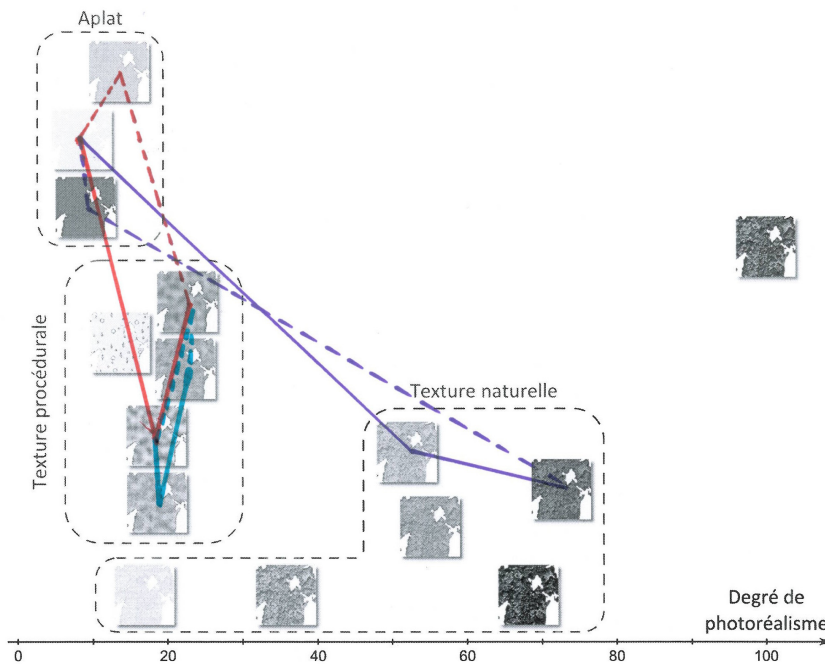


FIGURE 4.53 : Comparaison des chemins sélectionnés et proposés aux participants

Confirmation expérimentale Pour conforter ces résultats de choix de symbolisations pivots, cinq symbolisations de différents degrés de photoréalisme ont été proposées durant le test utilisateur : chacune pouvait être considérée comme la transformation d'une autre après utilisation d'une brique de symbolisation progressive. L'utilisateur devait les ordonner interactivement en les positionnant dans cinq cases pour former un continuum de symbolisations entre deux extrémités fixées, l'une très abstraite (un aplat vert clair), l'autre totalement photoréaliste (un extrait d'orthophoto) (Cf. question 5 dans le protocole décrit en annexe C). L'objectif était de confirmer l'ordre à privilégier pour le déclenchement des briques de symbolisation progressives.

La figure 4.54 présente pour chaque symbolisation la part des utilisateurs qui a placé cette symbolisation dans les différentes positions du continuum à construire.

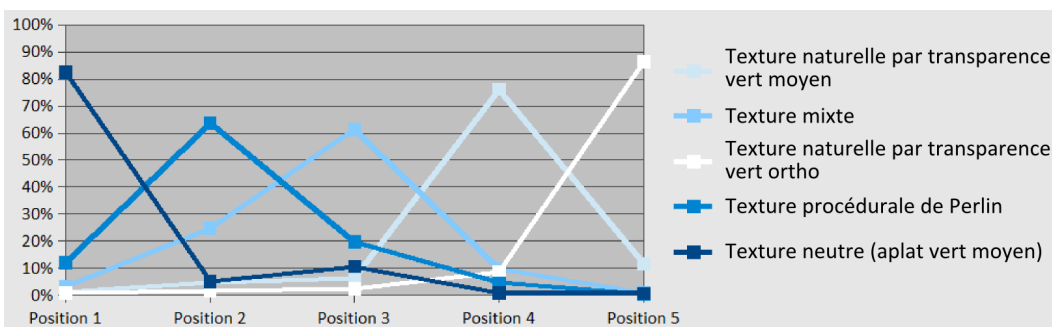


FIGURE 4.54 : Ordonnancement des symbolisations par les participants.

Encore plus que les résultats présentés pour l'autre mini-continuum de la figure 4.48, ces

résultats nous permettent de recréer un continuum doublement majoritaire : chaque répartition des positionnements d'une symbolisation présente un pic significatif indiquant le positionnement majoritaire de cette symbolisation et ces positionnements correspondent au continuum majoritaire créé par 50% des participants. Ce continuum majoritaire est présenté en figure 4.55 avec les briques de symbolisation progressive qui permettrait de passer d'une symbolisation à l'autre.

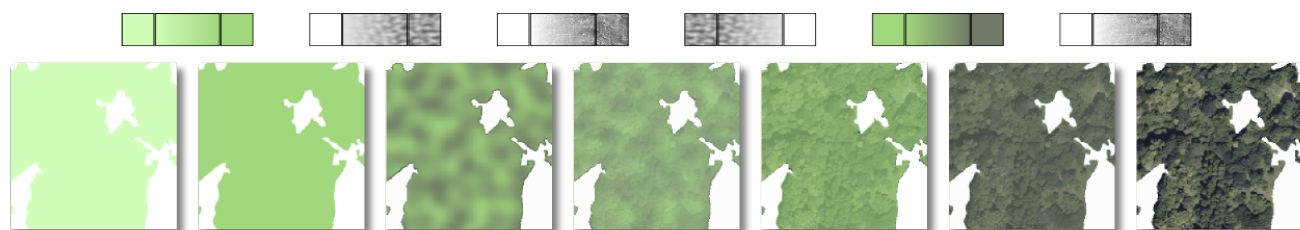


FIGURE 4.55 : Continuum majoritaire et briques de symbolisation progressive de transition entre les symbolisations.

De même que pour la construction de chemins élémentaires entre deux symbolisations, ce continuum résultat présente une évolution progressive du degré de photoréalisme et du type de texture des symbolisations ainsi ordonnées.

A partir de ce continuum construit par une majorité de participants, nous avons reconstitué une combinaison de briques de symbolisation progressive en figure 4.56. Ce graphique présente l'évolution des éléments de symbolisation en utilisant les briques de symbolisation dans l'ordre indiqué en figure 4.55 pour reconstruire le continuum majoritaire créé par les participants.

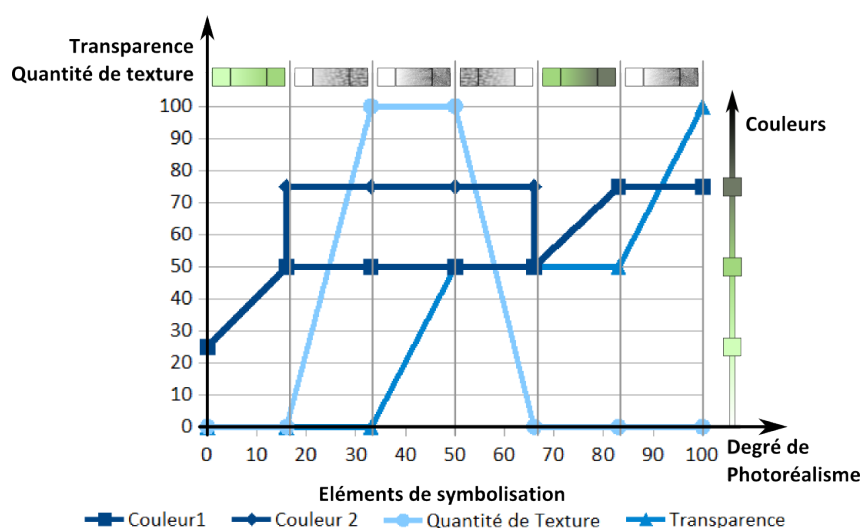


FIGURE 4.56 : Déclenchement des briques de symbolisation pour créer le continuum de la figure 4.55

Ces résultats nous indiquent un ordre d'utilisation entre plusieurs briques de symbolisation progressive (de coloration ou de texturation) privilégié par les participants. Cet ordre nous permet de construire un continuum de degré de photoréalisme plutôt progressif au regard des degrés de photoréalisme estimés (Cf. figure 4.42).

Cependant, comme les symbolisations proposées ne présentent qu'un élément de symbolisation différent les unes des autres, cet ordre ne présente des évolutions que d'un paramètre à

la fois. Pour réaliser une évolution graphique encore plus progressive, nous préconisons de faire évoluer plusieurs éléments de symbolisation en parallèle.

4.3.3 Correspondance des degrés de réalisme

Afin de garantir l'homogénéité globale du degré de photoréalisme d'une représentation cartographique intermédiaire, il est nécessaire de définir des points de correspondance entre les différents thèmes covisualisés. Pour cela, il s'agit de fixer des seuils compatibles entre les différentes briques de symbolisation utilisées. Dans cette optique, les représentations cartographiques intermédiaires présentées en figure 4.57 ont été proposées à l'utilisateur. Chaque représentation proposée est construite avec des symbolisations différentes pour le fond de carte, la mer et le réseau routier, ce qui confère des degrés de photoréalisme variés entre les représentations cartographiques globales.



FIGURE 4.57 : Représentations cartographiques proposées aux participants pour paramétrer la symbolisation de la végétation par rapport aux autres thèmes.

Pour lui permettre de paramétrer la symbolisation de la végétation, l'utilisateur dispose d'un curseur interactif modifiant cette symbolisation en parcourant l'ensemble des symbolisations présentées en figure 4.58 (Cf. question 7 dans le protocole décrit en annexe C).

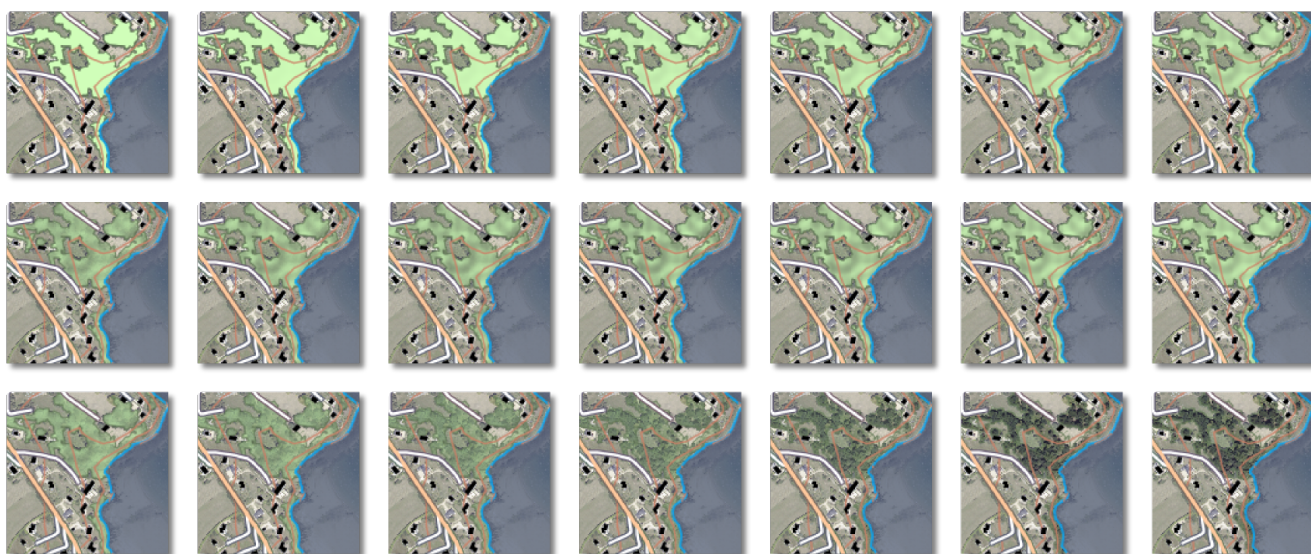


FIGURE 4.58 : Calibration de la symbolisation de la végétation par rapport à la représentation cartographique globale

Afin de ne pas influencer les participants en les incluant dans une logique de création d'un continuum, les représentations intermédiaires de la figure 4.57 ont été présentées dans le désordre.

L'objectif est de garantir l'homogénéité de chaque représentation cartographique globale en soi, indépendamment des autres représentations d'un même continuum. Toutefois, en figure 4.59 et 4.60, les résultats sont présentés dans l'ordre de degré de photoréalisme de la représentation globale. Nous souhaitons ainsi analyser les résultats les uns par rapport aux autres, afin de déterminer la cohérence des résultats et la pertinence de les exploiter comme aide au paramétrage d'un continuum complet.

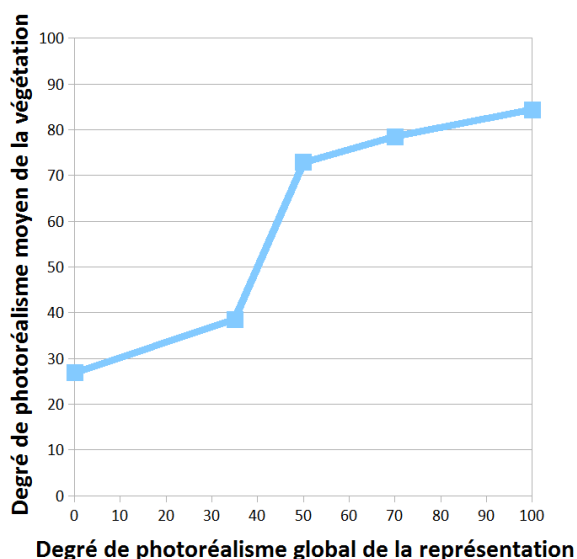


FIGURE 4.59 : Degré de photoréalisme moyen sélectionné pour la végétation au regard de la représentation globale.

Les résultats présentés en figure 4.59 attestent de la progressivité du degré de photoréalisme moyen paramétré par les participants. Cela légitime d'autant plus notre volonté de création d'un chemin graphique progressif entre deux représentations cartographiques.

Les représentations résultantes (incluant la symbolisation moyenne de la végétation) sont présentées en figure 4.60. Le fait de présenter une symbolisation moyenne explique le fait que la représentation cartographique la plus abstraite présente une symbolisation qui est déjà réaliste et la représentation cartographique intermédiaire la plus réaliste ne présente pas une symbolisation de la végétation uniquement extraite de l'orthophoto.



FIGURE 4.60 : Représentations incluant la symbolisation moyenne de la végétation choisie par les participants.

Cette expérimentation nous permet d'établir quelques points de correspondance entre symbolisations des différents thèmes du continuum cartographique en construction. Cependant, son

protocole présente plusieurs biais qui pourraient être évités dans un éventuel test utilisateur futur qui serait davantage dédié à la problématique de synchronisation des symbolisations inter-thèmes :

- Il est impossible de savoir si l'utilisateur a synchronisé la symbolisation de la végétation avec celle du fond de carte, celle de la mer ou celle des routes si celles-ci lui paraissaient présenter un degré de photoréalisme différent, puisque l'utilisateur ne pouvait manipuler qu'une seule symbolisation.
- De plus, l'évolution de la symbolisation de la végétation est fixée au préalable. L'utilisateur n'a pas la possibilité de choisir une autre symbolisation que celle présentée en figure 4.58, il ne peut pas choisir un paramétrage ou une combinaison différents des éléments de symbolisation de la végétation.
- Enfin, cette question est la dernière du test utilisateur. L'intuition première des participants est donc potentiellement déjà influencée par les autres questions visant à ordonner, qualifier et comparer des symbolisations variées.

Chapitre 5

Mise en œuvre : interpolation de la carte topographique à l'orthophotographie

Dans ce chapitre, nous mettons en œuvre notre méthode de conception d'un continuum cartographique pour former des représentations cartographiques intermédiaires permettant de réaliser une interpolation entre une carte topographique et une orthophotographie. Notre objectif est de créer un chemin graphique progressif et continu, c'est-à-dire sans créer de rupture visuelle. Nous souhaitons faire évoluer continûment le degré de réalisme et d'abstraction d'une représentation cartographique à l'autre le long de notre continuum.

Nous présentons tout d'abord les données cartographiques nécessaires à la conception d'un tel continuum en §5.1. Puis nous décrivons l'architecture et la modélisation de notre prototype développé au sein de la plateforme SIG de recherche GeOxygene au § 5.2. Enfin, des exemples d'interpolation de symbolisations sont introduits aux §5.3, avant d'être combinés pour former une proposition globale de continuum cartographique au §5.4.

La plateforme GeOxygene¹ implémente les normes de l'OGC (dont la norme SLD) afin de permettre le développement d'applications géographiques. La plupart des travaux du laboratoire COGIT y sont mis en œuvre afin d'être évalués et capitalisés [Bucher et al., 2012].

5.1 Choix des données

Notre méthode de conception se fonde sur la disponibilité de données vectorielles cartographiques et de données orthophotographiques de qualité suffisante pour être intégrées dans une représentation cartographique à grande échelle. De telles données orthophotographiques sont d'ores et déjà disponibles dans un grand nombre de pays et intégrées dans la plupart des portails de données géographiques comme nous l'avons observé dans la partie I. Pour la mise en œuvre de notre méthode, nous utilisons des extraits de la BD ORTHO® de l'IGN. Cette base de données géographique couvre l'ensemble du territoire français, avec une résolution de 50 cm et une fréquence de mise à jour de 3 ans. En ce qui concerne les données vectorielles cartographiques, nous utilisons celles conçues pour la réalisation du SCAN Express 25® de l'IGN. Ces données constituent une base de données cartographique, c'est-à-dire issue d'un ensemble de traitements de rédaction cartographique automatique (généralisation, placement des toponymes, symbolisation, etc.). Ainsi, ce sont des données vectorielles visualisables au 1/25 000^{ième} sous la forme d'une représentation cartographique symbolisée comme dans l'extrait présenté en figure 5.1.

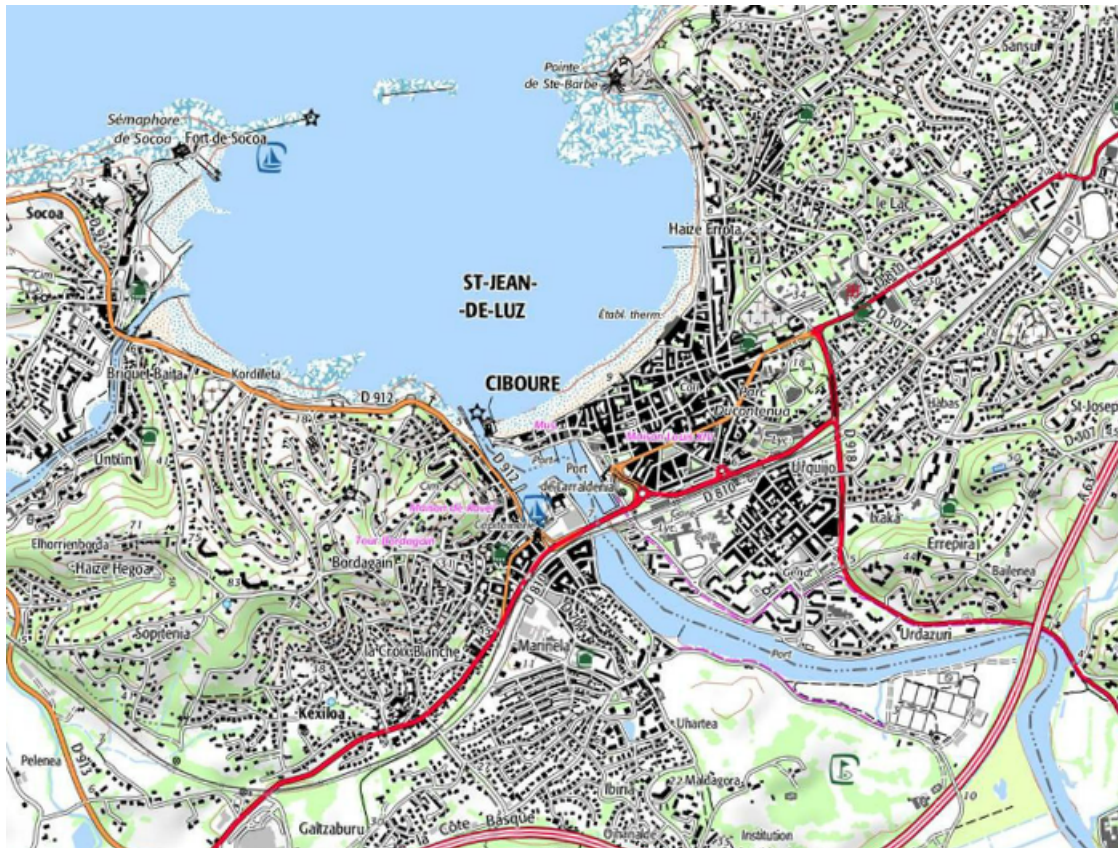


FIGURE 5.1 : Extrait du SCAN Express 25® de l'IGN.

Nous utilisons ces données pour nous abstraire des phases de rédaction cartographique déjà réalisées pour leur conception, en vue de nous concentrer sur la conception de représentations intermédiaires. En conséquence, nous appliquons une légende cartographique adaptée à l'échelle de visualisation de cette base de données cartographique. Cette légende cartographique est une adaptation de la légende du SCAN Express 25® à l'implémentation de la norme SLD existant dans GeOxygene, issue des travaux de [Ory et al. \[2014\]](#).

De plus, nous avons sélectionné un sous-ensemble de la base de données du SCAN Express 25® afin de créer une carte topographique allégée (Cf. figure 5.2) que nous utilisons comme extrémité pour la mise en œuvre de notre méthode de conception de continuum cartographique. Les thèmes cartographiques sélectionnés dans cette carte topographique sont les suivants :

- un thème **hydrographique** représentant la mer et les rivières principales sous la forme d'objets surfaciques.
- un thème de **végétation** représentant les forêts, bois, parcs, etc. sous la forme d'objets surfaciques.
- un thème de **bâtiments** regroupant les bâtiments quelconques, les bâtiments fonctionnels, les bâtiments religieux, et les bâtiments spéciaux en quatre sous-thèmes sous la forme d'objets surfaciques.
- un thème de **réseau** routier regroupant les autoroutes, les routes principales, les routes régionales, les routes locales et les autres routes en cinq sous-thèmes sous la forme d'objets linéaires.



FIGURE 5.3 : Orthophotographie de notre zone d'étude, extrait de la BD ORTHO®.

5.2 Prototype pour la mise en œuvre : un curseur pour parcourir notre continuum

Notre prototype de conception de continuum cartographique et de représentations cartographiques intermédiaires basé sur les briques de symbolisation est développé dans le langage de programmation java, au sein de la plateforme opensource GeOxygene. Ce prototype a été conçu sous la forme d'un plugin intégré à l'interface utilisateur de GeOxygene ; il est donc utilisable sous la forme d'une application client. Ainsi, dans ce paragraphe, nous présentons l'architecture de notre prototype de mise en œuvre, sous la forme d'un plugin GeOxygene. De plus, nous détaillons les éléments de modélisation principaux sur lesquels s'appuie notre prototype.

Architecture de notre prototype Comme indiqué au paragraphe précédent, nous utilisons des données cartographiques extraites de la base de données du SCAN Express 25® de l'IGN. De plus, nous disposons de données orthophotographiques de la BD ORTHO® de l'IGN. Ces données orthophotographiques, livrées sous la forme de dalles de 1km x 1km ont été prétraitées pour créer une orthoimage unique de notre zone d'étude, ainsi que des déclinaisons de cette orthoimage en noir et blanc, en couleurs désaturées, etc. selon la méthode décrite au paragraphe [4.2.2.](#)

Notre prototype se présente sous la forme d'un plugin à ajouter à l'interface de visualisation² de la plateforme GeOxygene. Pour l'utiliser, l'utilisateur doit donc ouvrir cette interface de visualisation, charger les données géographiques nécessaires à la conception du continuum cartographique en construction (données cartographiques constituant la carte topographique et orthoimage de la zone correspondante) et naviguer parmi les représentations cartographiques grâce à un curseur lui permettant de se positionner entre les deux extrémités. La figure 5.4 présente une copie d'écran de l'interface de visualisation de GeOxygene lorsque notre plugin est activé : un curseur a été ajouté en haut de la fenêtre de projet dans laquelle les données géographiques sont chargées et symbolisées en fonction de la position du curseur.

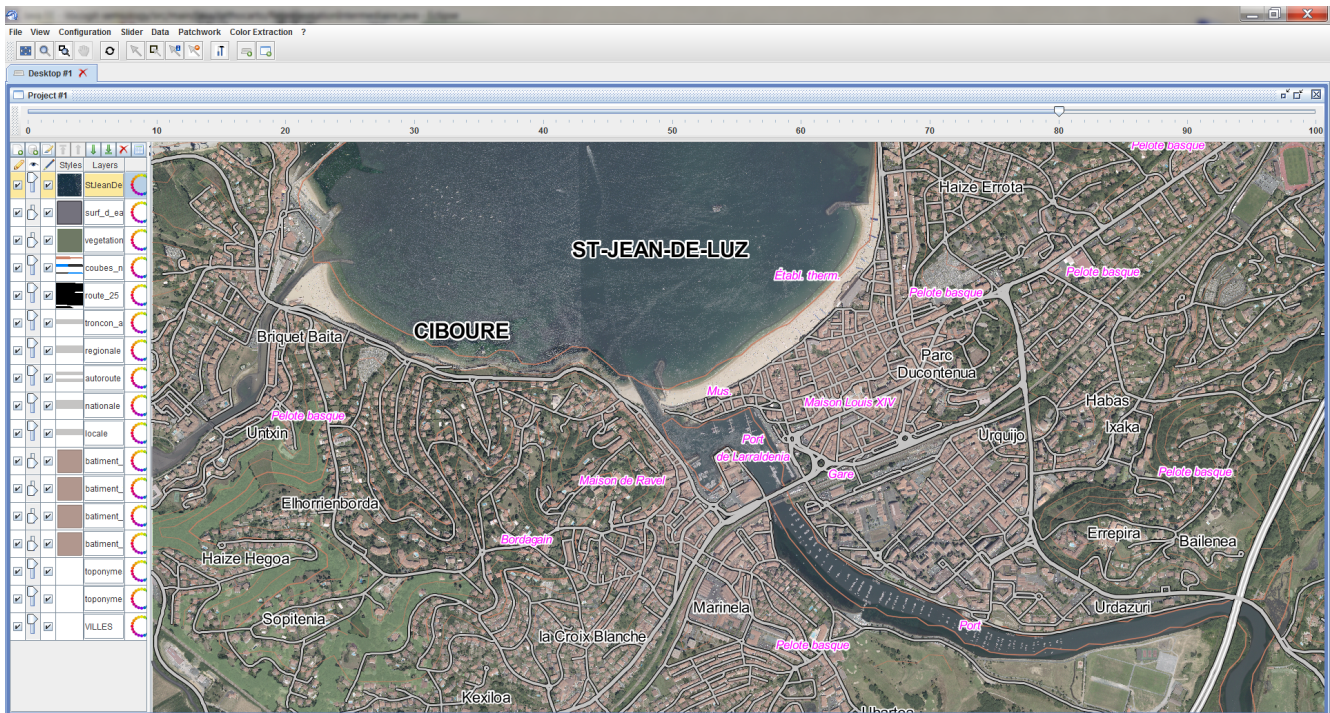


FIGURE 5.4 : Notre prototype intégré à l'interface de visualisation de GeOxygene.

Ainsi, l'architecture de prototype se décompose selon les éléments présentés en figure 5.5. L'utilisateur manipule le curseur mis à sa disposition. Cette interaction déclenche les méthodes de symbolisation préalablement paramétrées par le cartographe concepteur du continuum. L'application de ces méthodes de symbolisation modifie à la volée la symbolisation des différents thèmes cartographiques constituant le continuum pour former la représentation cartographique intermédiaire correspondant à la position du curseur définie par l'utilisateur.

²Le fonctionnement basique de l'interface de visualisation de GeOxygene est décrit à l'adresse suivante : oxygene-project.sourceforge.net/documentation/user/userguide2D.html.

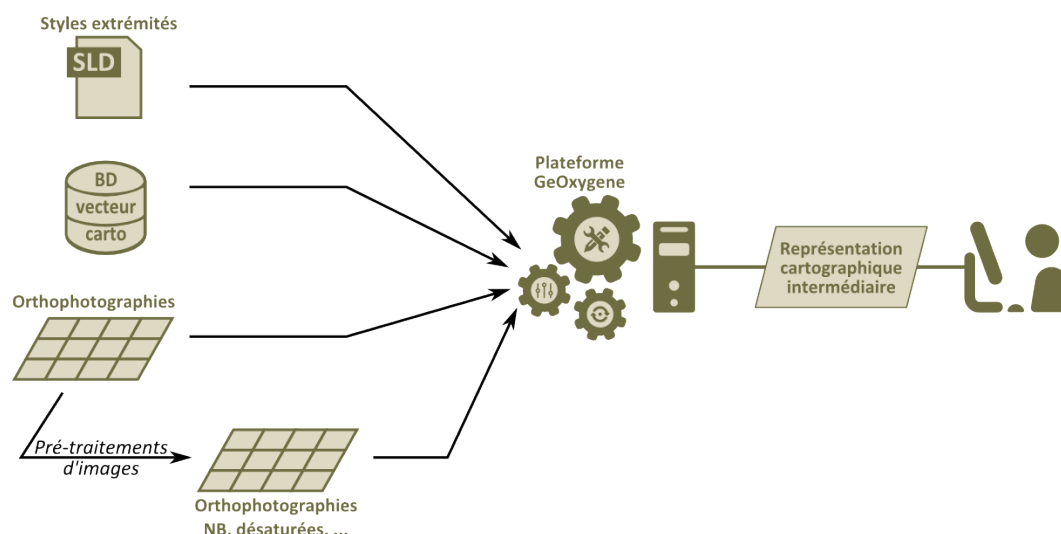


FIGURE 5.5 : Architecture de notre prototype.

Selon cette architecture, le rendu des représentations cartographiques intermédiaires s'effectue en deux passes pour prendre en compte les symbolisations interpolées et adaptées issues de nos briques élémentaires de symbolisation (Cf. figure 5.6).

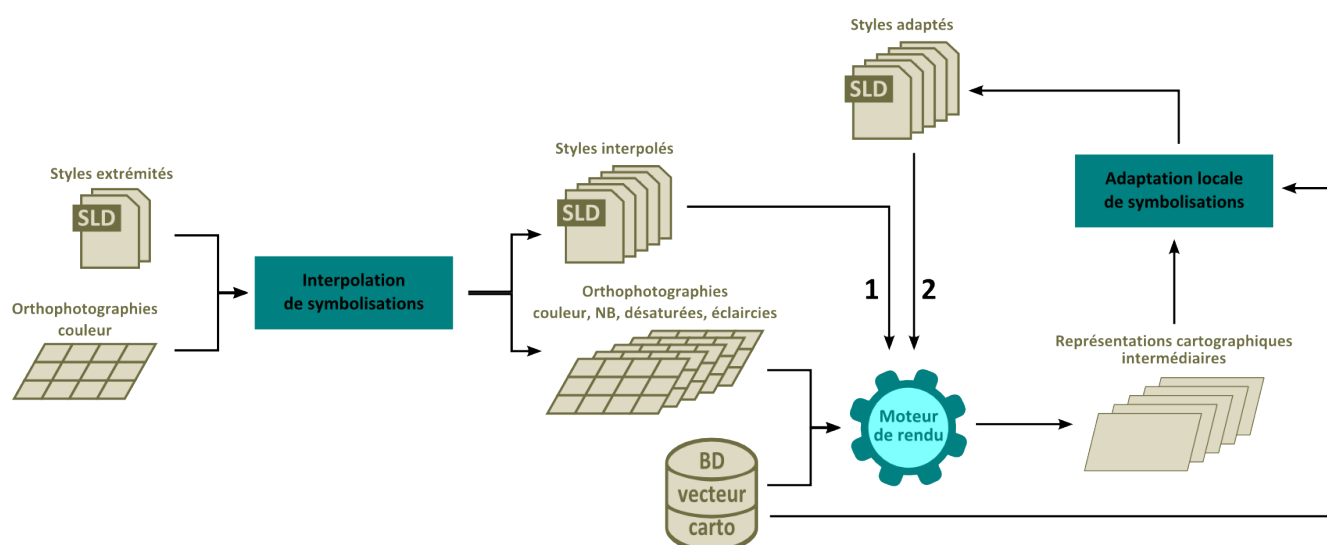


FIGURE 5.6 : Chaîne de rendu en deux passes pour combiner les briques d'interpolation et d'adaptation locale des symbolisations.

Tout d'abord, les briques d'interpolation de symbolisations génèrent un ensemble de styles cartographiques et un ensemble d'orthophotographies pré-traitées (converties en niveaux de gris, désaturées ou éclaircies) à partir des symbolisations des extrémités. La première passe de rendu (numérotée 1 en figure 5.6) prend en compte ces symbolisations interpolées pour créer un ensemble temporaire de représentations cartographiques intermédiaires à partir des données cartographiques vectorielles et des orthophotographies pré-traitées. Ces représentations intermédiaires temporaires sont utilisées pour analyser le contexte graphique des objets à mettre en valeur dans notre brique d'adaptation locale de la symbolisation. Cette brique génère un nouvel ensemble de

styles qui sont pris en compte lors de la deuxième passe de rendu (numérotée 2 en figure 5.6) pour créer un ensemble final de représentations cartographiques intermédiaires.

Éléments principaux de modélisation La figure 5.7 présente une synthèse des concepts nécessaires à la modélisation de notre prototype. Cette modélisation met l'accent sur l'interaction de l'utilisateur qui choisit la représentation cartographique visualisée et déclenche ainsi une modification de la légende et de la symbolisation correspondantes.

Notre prototype s'appuie sur deux modèles issus de travaux précédents : la modélisation de ce qu'est une légende cartographique dans le cadre des travaux en conception cartographique (dont une synthèse est proposée par Hoarau et Mustière [2011]) et les normes *Styled Layer Description* [Lupp, 2007] et *Symbology Encoding* [Müller, 2006] visant à proposer un format de partage standardisé des symbolisations cartographiques. Ces deux modèles sont implémentés dans la plateforme GeOxygene. Le modèle de légende sur lequel nous nous appuyons est identifié en vert sur la figure 5.7, tandis que les éléments des normes SLD et SE que nous utilisons et étendons sont identifiés en violet sur la figure 5.7. Enfin, les éléments identifiés en bleu sur la figure 5.7 sont ceux que nous proposons ou étendons pour implémenter notre prototype de mise en œuvre.

Deux concepts sont ajoutés au modèle de légende pour prendre en compte de nouveaux types de données nécessaires à la conception de représentations mixtes : le **Fond de carte** qui est identifié pour pouvoir être manipulé indépendamment et spécifiquement par rapport aux autres objets cartographiques, le concept d' **Orthophotographie** afin de pouvoir les intégrer, les pré-traiter, et leur appliquer des méthodes de rendus sophistiquées. De plus, le concept de **Contexte Graphique** est associé aux objets cartographiques afin de pouvoir être délimités, caractérisés et utilisés au sein de notre brique de symbolisation localement adaptative.

Les normes SLD et SE ont été étendues pour permettre la description de **Texture Procédurale**. Les attributs de cette classe permettent actuellement de décrire une texture procédurale utilisant le bruit de Perlin [Perlin, 1985] : ce sont les paramètres de **Granularité**, d'**Angle**, d'**Etirement**, de **Quantité** et les deux couleurs permettant d'appliquer un dégradé de couleurs à l'image de bruit générée (**Couleur1** et **Couleur2**). De plus les classes **Stroke** et **Fill** ont été étendues : les méthodes d'interpolation de la couleur et de la transparence ont été ajoutées pour permettre la mise en œuvre de notre brique d'interpolation de symbolisation. De même, la classe **Texture Procédurale** possède également des méthodes permettant l'interpolation de ses propres attributs. Enfin, un attribut a été ajouté à la classe **Stroke** pour permettre l'application d'une **Couleur adaptative** dépendant du **Contexte graphique** de l'objet à symboliser selon notre méthode d'adaptation locale de la symbolisation.

Enfin, la classe **Continuum** a été créée pour regrouper toutes les représentations cartographiques qui constituent ce continuum. La classe **Visualisation** représente l'interface ou l'application permettant à l'**Utilisateur** de parcourir le continuum et de choisir la **Représentation cartographique** qu'il préfère ou qui est la plus adaptée à son besoin. Pour cela, il dispose d'**Outils interactifs**, comme par exemple le **Slider** implémenté dans notre prototype ou d'outils de covisualisation comme ceux décrits en partie I.

Toutes ces classes ont été implémentées ou étendues au sein de la plateforme GeOxygene. Dans les paragraphes suivants, nous présentons des exemples de symbolisations et de représentations intermédiaires obtenues par le biais de notre prototype.

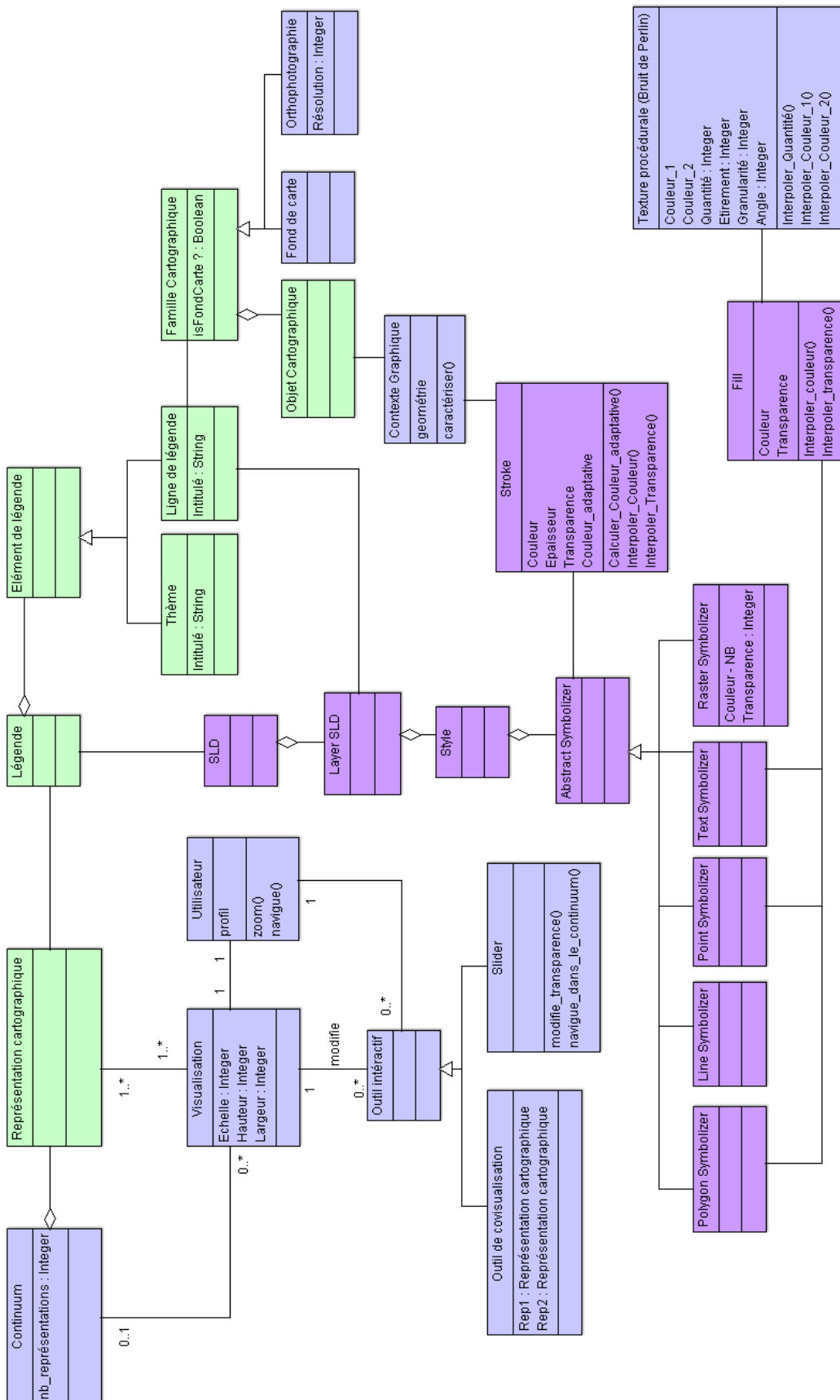


FIGURE 5.7 : Modèle complet pour la conception de représentations cartographiques intermédiaires

5.3 Exemples d'interpolations de symbolisations de la carte topographique à l'orthophotographie

Dans ce paragraphe, nous présentons plusieurs exemples d'utilisation de notre méthode d'interpolation de symbolisations pour répondre à notre objectif de création d'un continuum cartographique entre une carte topographique et une orthophotographie. Pour la plupart des thèmes de la carte topographique, des solutions d'interpolation sont proposées pour créer un chemin graphique vers l'orthophotographie. Ainsi, nous proposons des façons de rendre une symbolisation plus naturelle, moins abstraite ou plus réaliste selon les symbolisations interpolées.

5.3.1 Une symbolisation plus ou moins naturelle de la mer

Deux solutions sont proposées pour rendre la représentation de la mer plus naturelle progressivement, l'une mettant en jeu une brique d'interpolation de symbolisations, l'autre combinant deux briques successivement. Dans les deux cas, l'enjeu est de concevoir un chemin graphique entre les extrémités présentées en figure 5.8. Pour le thème hydrographique, ces deux extrémités présentent des éléments de couleurs et de textures différents : un aplats bleu ciel pour l'une et une texture naturelle de plan d'eau pour l'autre.

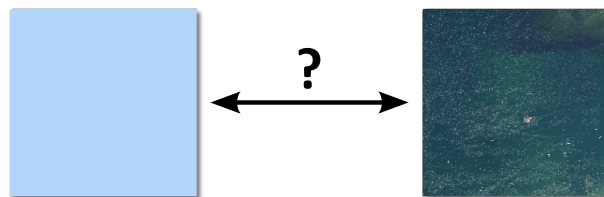


FIGURE 5.8 : Extraits de symbolisations de la mer dans nos extrémités cartographiques.

Nous proposons deux solutions pour réaliser une interpolation de symbolisations entre ces deux extrémités. Les deux chemins graphiques obtenus par l'application de ces deux solutions sont illustrés en figure 5.9. La première solution d'interpolation consiste à interpoler le paramètre de transparence de l'aplat bleu ciel pour laisser fondre progressivement cette couleur tout en faisant apparaître progressivement la texture de l'orthophotographie, en allant de la carte à l'orthophotographie. Quatre représentations intermédiaires obtenues grâce à cette solution sont présentées en figure 5.9, en haut, avec la brique de transparence associée. La deuxième solution consiste à décliner indépendamment les éléments de couleur et de texture en utilisant successivement une brique d'interpolation de la couleur puis une brique d'interpolation de la transparence. La brique d'interpolation de la couleur fera varier la couleur de l'aplat du bleu ciel de la carte topographique vers le bleu foncé préalablement extrait de l'orthophotographie. Cela permettra de rendre la couleur progressivement plus ou moins naturelle. En outre, tout comme dans la première solution, la brique d'interpolation de la transparence permettra de faire apparaître plus ou moins la texture de l'orthophotographie. Dans cette solution, la couleur naturelle de la mer, extraite de l'orthophotographie, est donc utilisée comme pivot entre une représentation en aplats et une représentation naturellement texturée. Quatre représentations intermédiaires obtenues grâce à cette solution sont présentées en figure 5.9, en bas, avec les briques d'interpolation de la couleur et de la transparence associées.

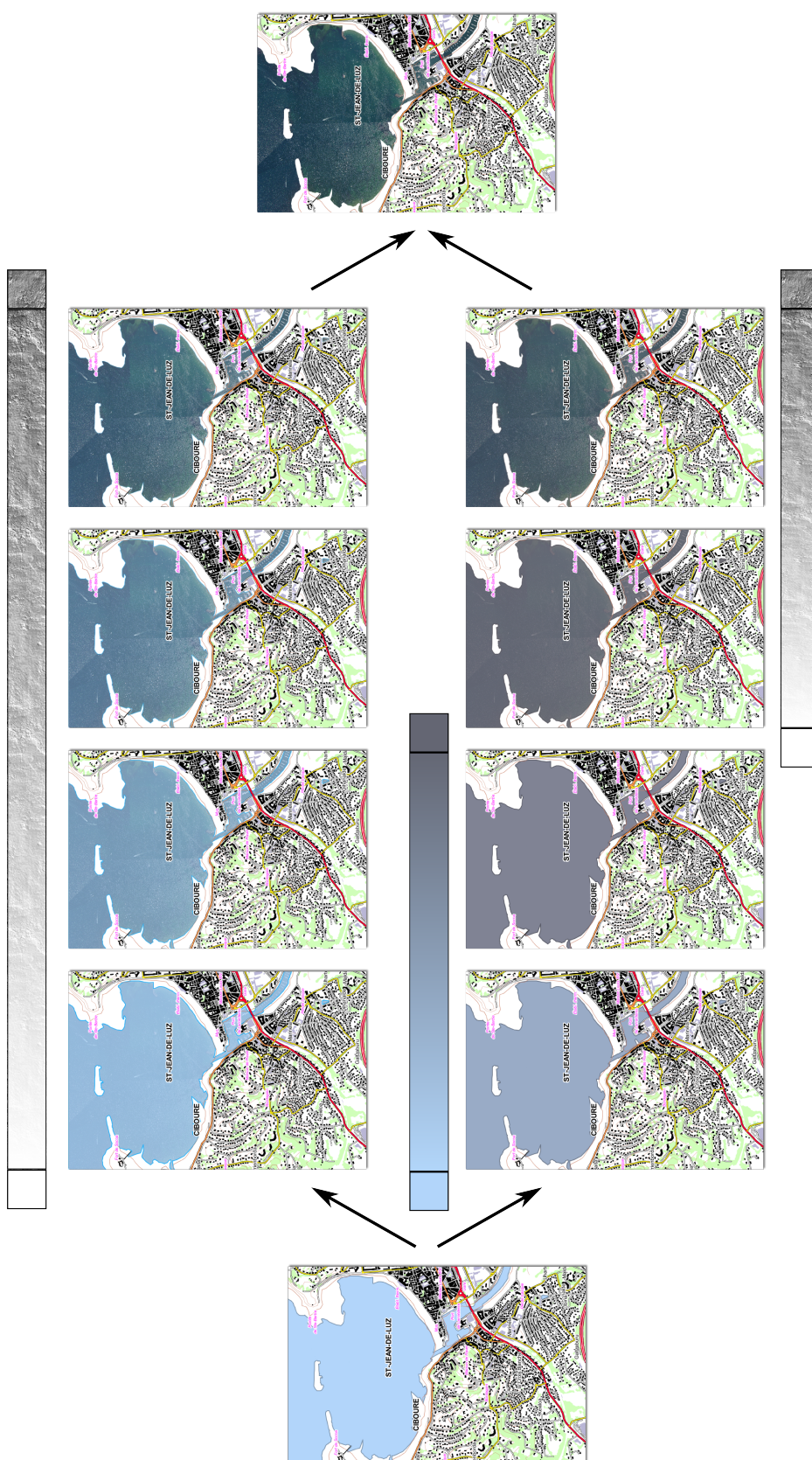


FIGURE 5.9 : Représentation progressive de la mer par interpolation de transparence ou de couleur et de transparence.

5.3.2 Une symbolisation plus ou moins abstraite et plus naturelle du réseau routier

Le réseau routier est un thème cartographique indispensable à la compréhension du territoire. En effet, c'est un élément structurant de l'espace géographique, c'est pourquoi il est généralement saillant dans les cartes topographiques : il est d'ailleurs identifié à ce titre par [Ory et al. \[2014\]](#) comme un thème déterminant pour la caractérisation du style topographique IGN. Dans le but de transmettre une information exhaustive sur ce thème cartographique indispensable à la compréhension du territoire, la symbolisation utilisée pour ce thème est généralement très abstraite : elle est constituée d'une information hiérarchique administrative (autoroutes, routes principales, routes régionales, routes locales et autres routes) traduite par un dégradé de couleurs vives abstraites, c'est-à-dire qui ne correspond pas aux couleurs des routes dans la réalité ou dans l'orthophotographie. Cette hiérarchisation administrative est généralement accompagnée d'une hiérarchisation fonctionnelle selon le nombre de voies de circulation souvent représentée par des épaisseurs différentes. Nous avons pris le parti de ne pas reproduire cette hiérarchie fonctionnelle dans notre carte topographique de référence. L'épaisseur des routes est également fonction de la hiérarchisation administrative et reste fixe pour l'ensemble des représentations du continuum. En conséquence, nous nous intéressons uniquement à la hiérarchisation administrative traduite par la couleur dans ce paragraphe.

Pour réduire le niveau d'abstraction de cette information et créer des symbolisations intermédiaires moins abstraites puis plus naturelles, nous proposons une combinaison de plusieurs briques d'interpolation de la couleur.

La figure 5.10 présente des représentations cartographiques identiques à l'exception de la représentation des routes qui évolue grâce à l'utilisation des briques d'interpolation de la couleur décrites ci-dessus. Dans un premier temps, trois briques d'interpolation de la couleur sont appliquées simultanément sur les différentes catégories de routes afin de supprimer progressivement la hiérarchie traduite par le dégradé de couleur rouge - orange - jaune - blanc, en amenant progressivement toutes les catégories à être symbolisées en blanc (représentées en haut à gauche en figure 5.10). Puis, une dernière brique d'interpolation de la couleur est appliquée pour faire évoluer progressivement la couleur des routes vers leur couleur naturelle, extraite de l'orthophotographie (représentées en haut à droite en figure 5.10).

Enfin, nous faisons le choix de ne pas appliquer de brique d'interpolation de la transparence pour faire disparaître les routes dans l'orthophotographie. En effet, le réseau routier est un thème cartographique trop important pour envisager qu'il puisse apparaître en semi-transparence et être peu visible au sein du continuum cartographique. Les routes seront donc opaques jusqu'à la dernière étape du continuum, l'extrémité orthophotographique. Nous assumons que cela crée une rupture graphique. Cependant, cette rupture nous semble moins préoccupante que l'utilisation d'une symbolisation inadaptée pour un thème cartographique d'importance.

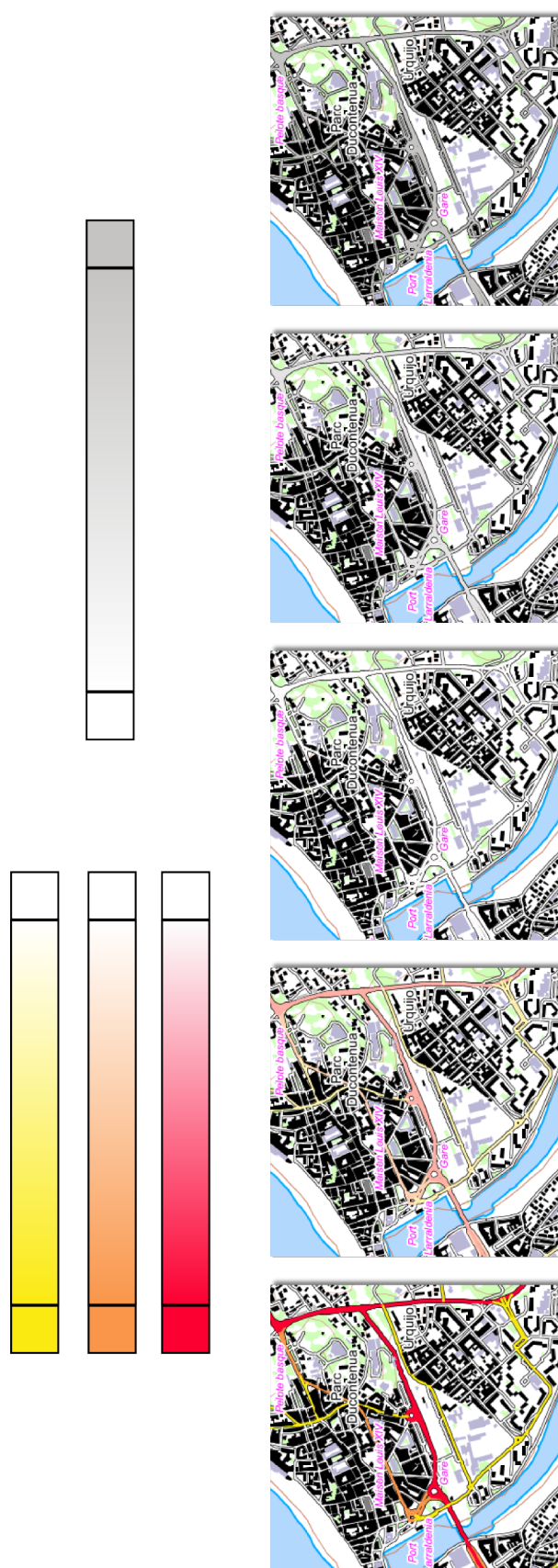


FIGURE 5.10 : Représentation progressive des routes par interpolation de couleurs.

5.3.3 Une symbolisation plus ou moins abstraite, naturelle et réaliste du bâti

De même que le réseau routier, le thème cartographique regroupant les bâtiments est généralement représenté par une symbolisation catégorisée permettant de distinguer les différents types de bâtiments par l'utilisation de la variable visuelle couleur. Dans notre extrémité cartographique, les bâtiments sont regroupés en trois catégories : les bâtiments quelconques représentés en noir, les bâtiments fonctionnels représentés en mauve pâle, et les bâtiments religieux représentés en gris. Dans notre extrémité orthophotographique, ce sont les toits des bâtiments qui sont visibles. Dans notre zone d'étude, les toits sont majoritairement recouverts de tuiles de terre cuite, les bâtiments sont donc repérables par la couleur rougeâtre de leur toit. La figure 5.11 présente des extraits de nos deux extrémités focalisés sur une zone urbaine dense permettant d'observer les deux types de symbolisation des bâtiments entre lesquels il nous faut définir un chemin graphique.

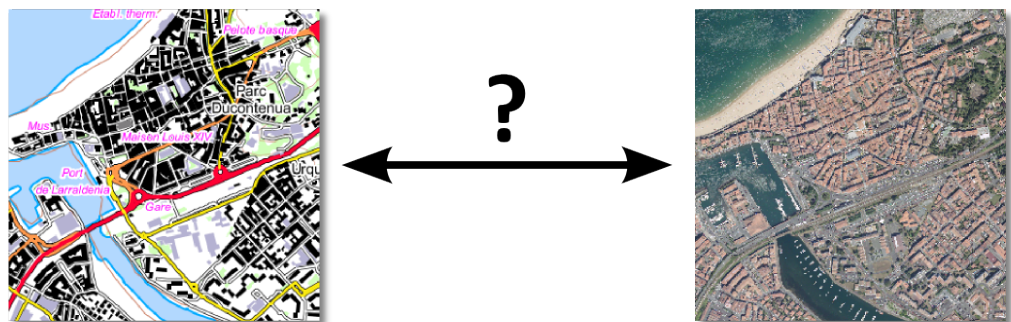


FIGURE 5.11 : Extraits de symbolisations des bâtiments dans nos extrémités cartographiques.

Pour créer un chemin graphique entre les symbolisations de nos deux extrémités, nous proposons d'utiliser une combinaison de plusieurs briques d'interpolation de symbolisation. Les paramètres de texture seront manipulés séparément pour contrôler le côté naturel de la symbolisation en deux temps. D'une part, la symbolisation catégorisée de la carte topographique sera éliminée progressivement en interpolant les couleurs des trois catégories vers la couleur naturelle des toits des bâtiments préalablement extraite de l'orthophotographie. D'autre part, la transparence sera interpolée pour faire apparaître ou disparaître progressivement la texture naturelle des toits issue de l'orthophotographie (toits à double pans couverts de tuiles rouges).

La figure 5.12 présente des représentations cartographiques où seule la symbolisation des bâtiments évolue selon la combinaison de briques de symbolisation décrites ci-dessus. Les briques d'interpolation de la couleur sont présentées au dessus des représentations intermédiaires obtenues. Les exemples sont déclinés avec un fond cartographique (au centre) et un fond orthophotographique (en bas), afin de permettre une analyse de la disparition de la catégorisation des bâtiments dans la carte d'une part, et l'intégration graphique dans l'orthophotographie d'autre part.

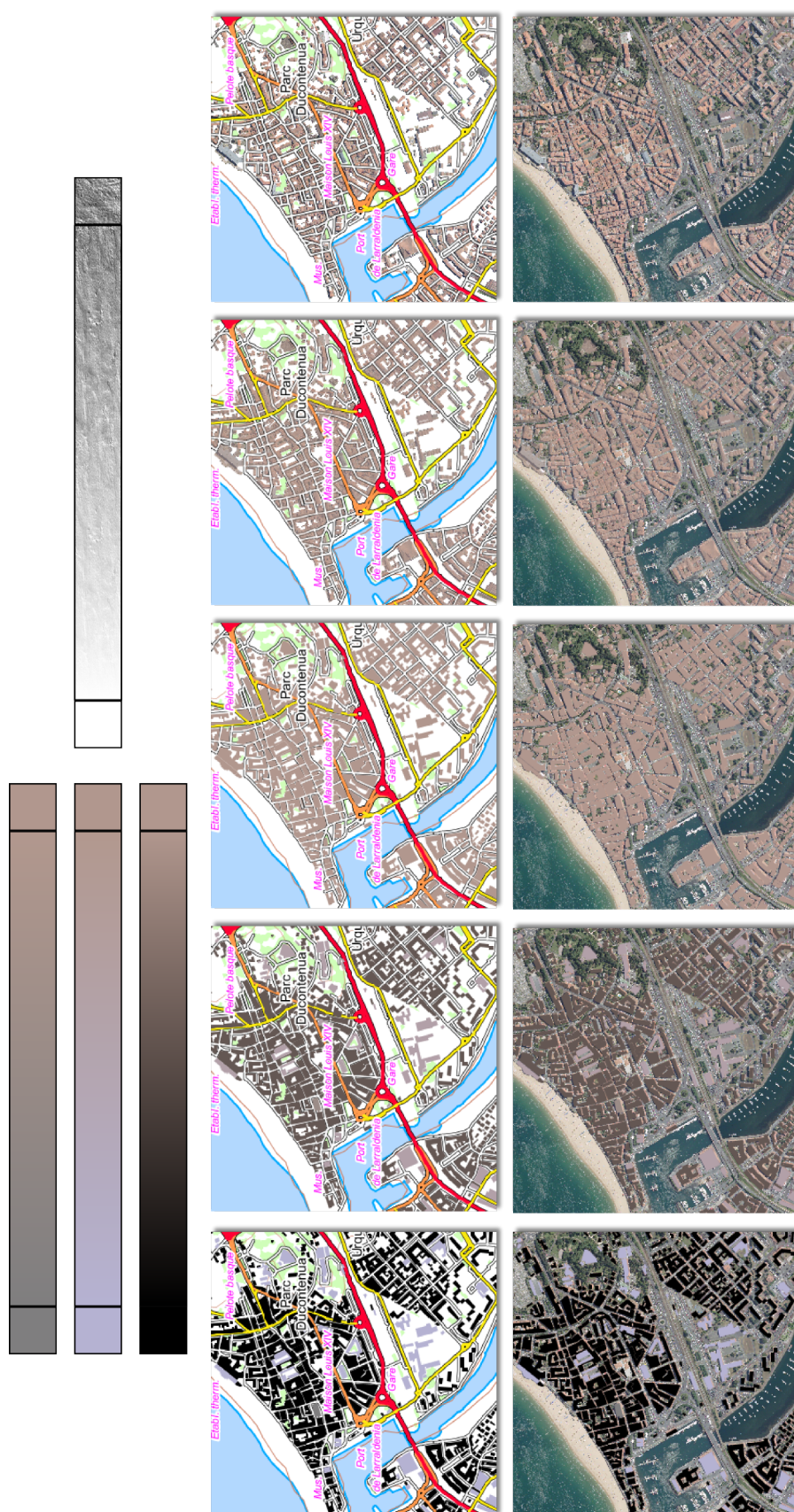


FIGURE 5.12 : Représentation progressive du bâti par interpolation de couleur et de transparence.

5.3.4 Une symbolisation plus ou moins réaliste de la végétation

Afin de faire varier progressivement le degré de photoréalisme de la symbolisation de la végétation, nous utilisons les résultats du test utilisateur présenté au paragraphe 4.3. Nous reprenons l'ordonnancement majoritaire des symbolisations proposées aux participants (Cf. figures 4.55 et 4.56) et le modifions en exploitant les valeurs de degré de photoréalisme estimées par les participants (Cf. figure 4.42). La combinaison de ces deux résultats issus de notre test utilisateur nous permet d'établir la combinaison de briques de symbolisation présentée en figure 5.13. Dans cette combinaison, les briques sont utilisées dans le même ordre que celui de la figure 4.56, et les symbolisations pivot (positionnées entre deux briques de symbolisation) sont positionnées selon leur degré de photoréalisme estimé. Ainsi les briques sont appliquées pendant un nombre d'étapes différentes les unes des autres, mais cela a pour but d'assurer une variation linéaire du degré de photoréalisme perçu.

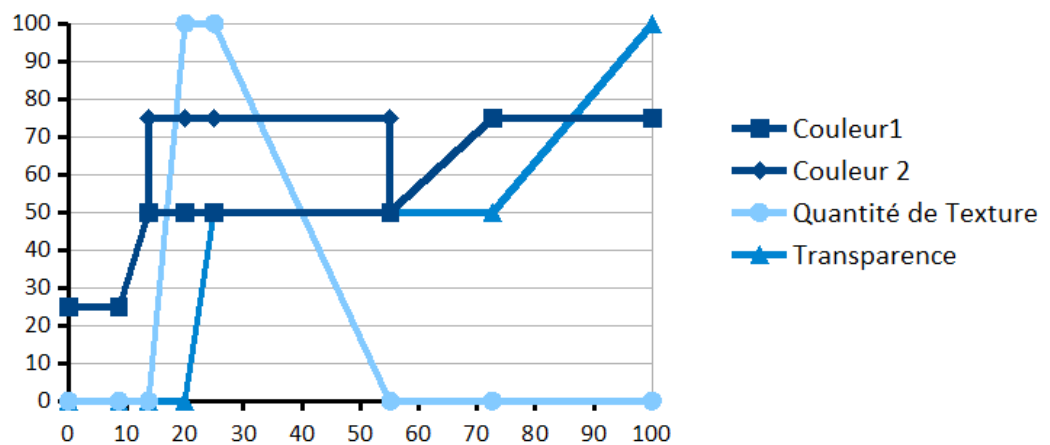


FIGURE 5.13 : Paramétrage des briques de symbolisation par le degré de photoréalisme perçu.

Les éléments de symbolisation manipulés selon la combinaison de briques de symbolisation présentée en figure 5.13 sont : la couleur de l'aplat issue de la carte topographique, la transparence de cet aplat et la quantité de texture procédurale de Perlin qui est intégrée puis retirée progressivement. La symbolisation résultante présentera donc successivement un aplat coloré, une texture procédurale, une double texture (procédurale et naturelle par transparence avec le fond orthophotographique), puis une texture naturelle simple par transparence avec l'orthophotographie. Des exemples de ces différents états de symbolisation sont présentés en figure 5.14, au regard des briques d'interpolation de symbolisation utilisées et du degré de photoréalisme. Ces symbolisations sont présentées au sein d'une représentation cartographique dont les symbolisations sont fixées exceptée celle de la végétation.

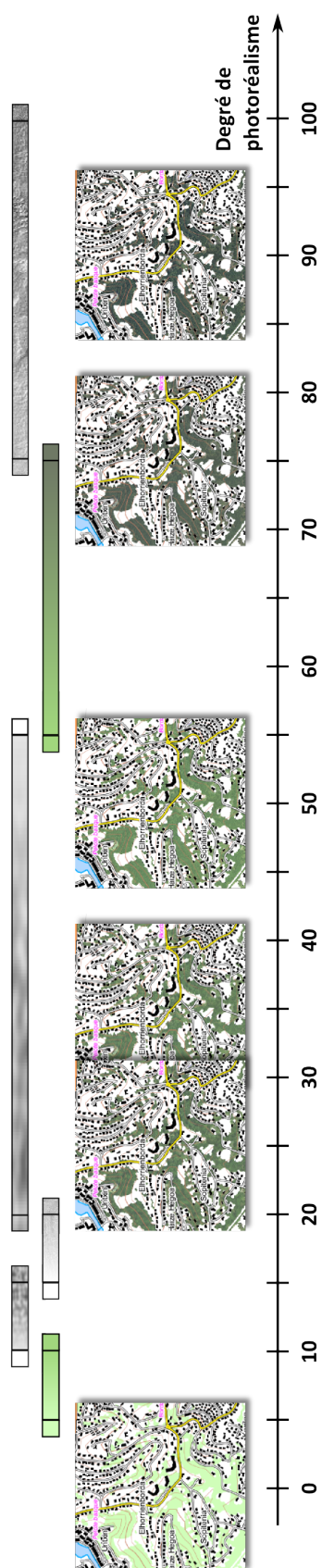


FIGURE 5.14 : Représentation progressive de la forêt dans une représentation cartographique par combinaison de six briques d'interpolation de symbolisations.

5.3.5 Une symbolisation plus ou moins texturée du fond de carte

Le fond de carte n'est pas toujours considéré comme un thème cartographique à part entière. Parfois, il est uniquement constitué de l'espace cartographique vide, celui où aucun objet cartographique n'a été représenté. Il est généralement symbolisé par un aplat blanc, ce qui revient à ne pas être symbolisé dans le cas d'une réalisation d'une carte papier imprimée sur du papier blanc par un procédé de synthèse additive. Ainsi, le fond de carte ne transmet pas d'information particulière mis à part l'absence d'objets cartographiques des autres thèmes de la représentation. Cependant, cela ne reflète pas toujours fidèlement la réalité du terrain. En effet, il existe de nombreux objets géographiques qui ne sont pas représentés sur les cartes topographiques. Par exemple, la comparaison des deux extraits de carte et d'orthophotographie de la figure 5.15 illustre l'absence de représentation des parcelles agricoles dans la carte topographique. Ces extraits transmettent donc deux visions bien différentes du territoire représenté, l'une apportant plutôt l'image d'un territoire vide quand l'autre fait état d'un remplissage continu de l'espace par des cultures contigües.



FIGURE 5.15 : Extrait de fond de carte et de fond orthophotographique sur un même territoire.

Pour pallier à cette impression de vide, nous proposons d'intégrer progressivement l'information contenue dans l'orthophotographie au fond de carte. Pour cela, nous utilisons la brique d'interpolation des couleurs adaptée à une donnée image proposée au paragraphe 4.2.2. L'orthophotographie est donc progressivement désaturée, puis éclaircie jusqu'à obtention du fond blanc de notre extrémité par interpolation des couleurs des pixels. La figure 5.16 présente des représentations cartographiques intégrant ces symbolisations intermédiaires du fond de carte. L'utilisation d'une symbolisation pivot en noir et blanc permet de manipuler indépendamment la texture et les couleurs issues de l'orthophotographie. En effet, entre l'aplat blanc et la symbolisation en noir et blanc, la texture apparaît et disparaît progressivement, indépendamment des couleurs de l'orthophotographie. Puis, entre la symbolisation en noir et blanc et le fond orthophotographique en couleur, ce sont les couleurs naturelles de l'orthophotographie qui sont plus ou moins présentes, indépendamment de la texture. Cette brique d'interpolation de la couleur avec une symbolisation pivot permet donc de créer un chemin graphique en deux temps.

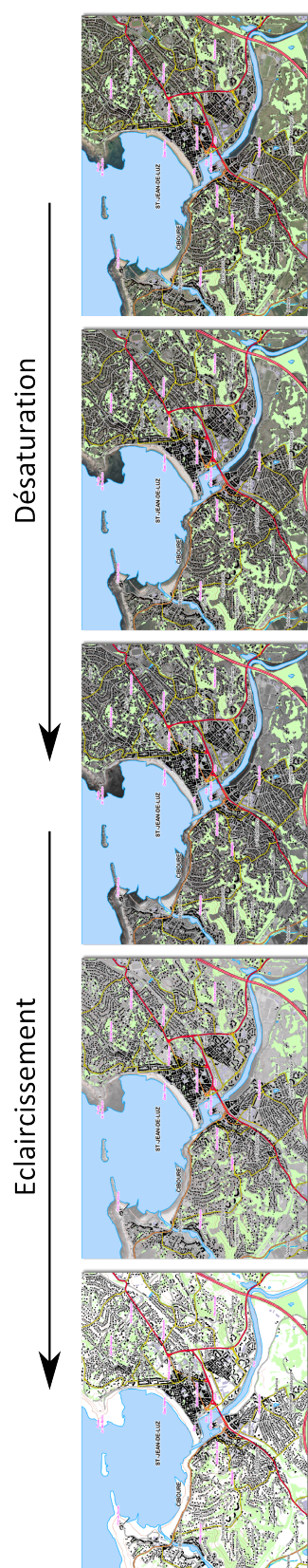


FIGURE 5.16 : Représentation progressive du fond de carte dans une représentation cartographique.

5.4 Proposition d'un continuum progressif entre réalisme et abstraction

Dans ce paragraphe, nous proposons un paramétrage complet permettant la création d'un continuum cartographique entre une carte topographique et une orthophotographie. L'ensemble des briques d'interpolation de symbolisation présentées aux paragraphes précédents est mis en œuvre pour interpoler simultanément tous les thèmes cartographiques constituant les extrémités du continuum. L'objectif est d'assurer une évolution continue et linéaire du degré de réalisme et d'abstraction. Il s'agit donc de faire évoluer tous les thèmes en synchronisant leur degré de réalisme pour obtenir un ensemble de représentations cartographiques intermédiaires homogènes. Les résultats de la dernière partie de notre test utilisateur décrivant des seuils de correspondance, définis par les utilisateurs entre les différents thèmes et la végétation, nous ont guidé pour cette étape.

La figure 5.17 présente les extrémités du continuum (la carte topographique en haut à gauche, et l'orthophotographie en bas à gauche), et quatre représentations cartographiques intermédiaires obtenues à intervalles réguliers au sein du continuum ainsi créé. Des extraits de ces composants du continuum sont présentés en figures 5.18 et 5.19. Ces extraits présentent des symboles cartographiques adaptés au 1/25 000^{ième}. Ils sont présentés ici de façon caricaturale pour que le lecteur puisse observer en particulier les effets de l'adaptation locale des symbolisations des contours du réseau routier, et en général l'évolution graphique des symbolisations des différents thèmes cartographiques.

Les caractéristiques graphiques de nos extrémités sont prises en compte dans la conception du continuum. D'une part, la légende initiale de l'extrémité cartographique est utilisée comme un des points de départ ou d'arrivée de l'interpolation de représentations. Les couleurs vives et la hiérarchisation du réseau routier, la catégorisation du bâti ou encore les couleurs claires et vives de la mer et la végétation sont utilisées comme extrémités de différentes briques d'interpolation. D'autre part, les caractéristiques de texture et de couleurs naturelles de l'orthophotographie sont considérées comme des paramètres de symbolisation à atteindre ou dont il faut s'éloigner. De plus, toutes ces caractéristiques graphiques sont utilisées comme source d'inspiration pour le paramétrage de certaines briques d'interpolation de symbolisation ou pour la création de symbolisation pivot. La texture de l'orthophotographie en noir et blanc est utilisée comme symbolisation pivot entre différentes phases de désaturation et d'éclaircissement (Cf. § 5.3.5). De même, les couleurs naturelles extraites de la mer, de la végétation, des toits de bâtiments et du réseau routier sont utilisées comme symbolisation pivot. Enfin, le fond de chaque représentation cartographique intermédiaire est pris en compte localement afin d'assurer la lisibilité du réseau routier, élément majeur pour la compréhension du territoire. Pour cela, nous appliquons notre méthode d'adaptation locale de la symbolisation au contour du réseau routier pour les représentations ayant un fond orthophotographique coloré (en bas à droite et au centre en figure 5.17, et en haut et au centre en figure 5.19).

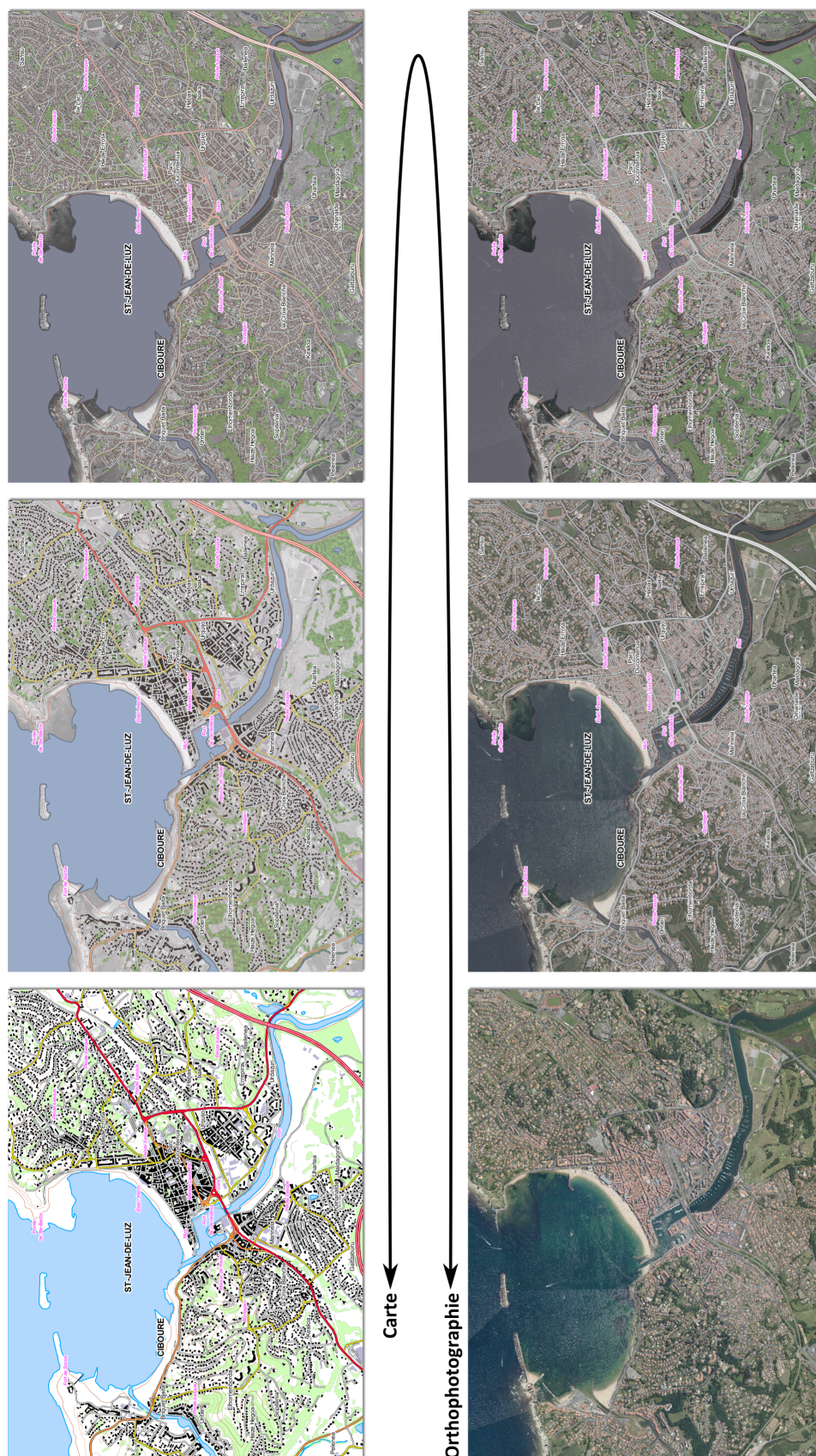


FIGURE 5.17 : Extrémités et représentations cartographiques intermédiaires de notre continuum entre abstraction et réalisme.

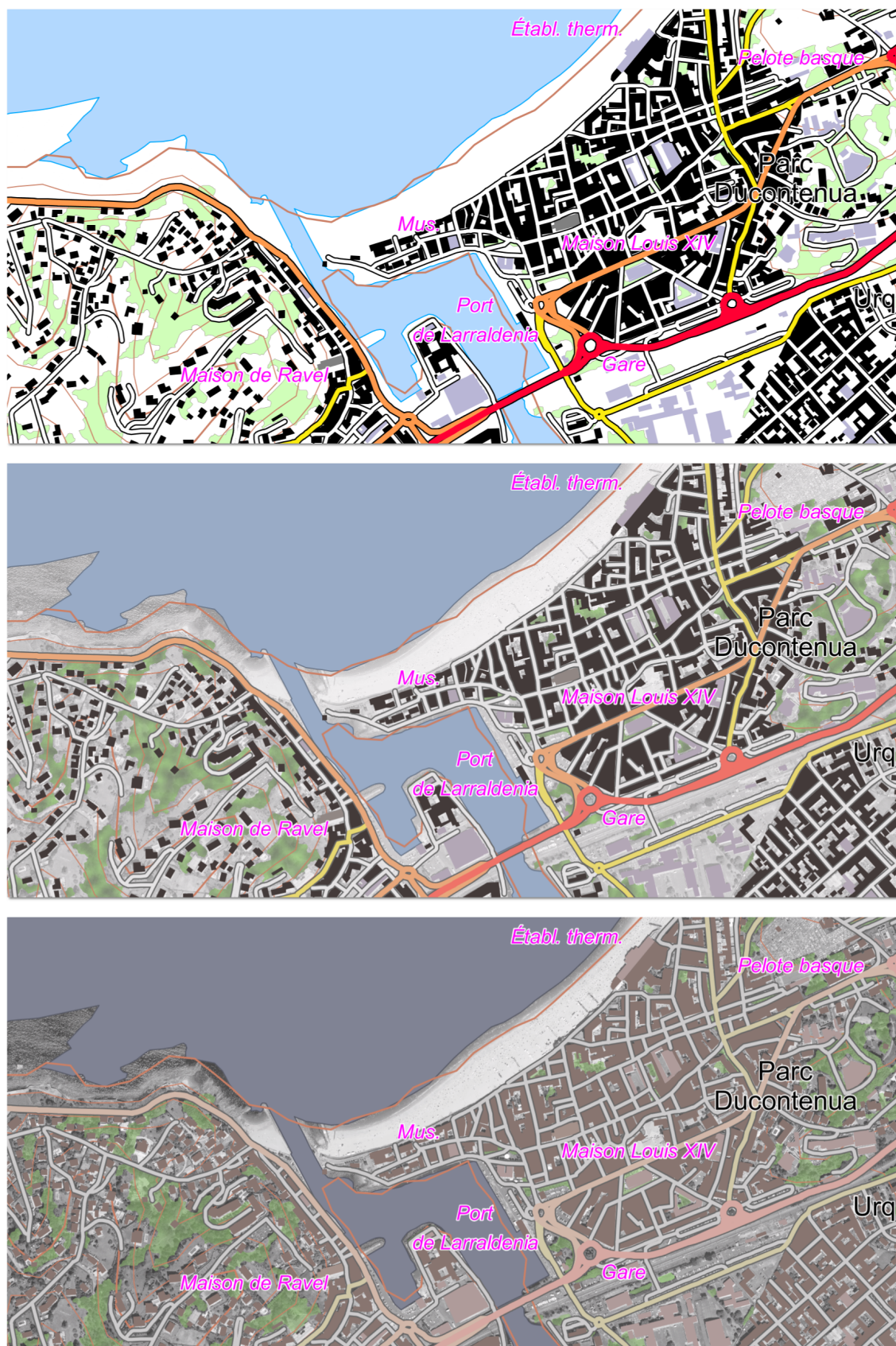


FIGURE 5.18 : Extraits de la carte et de représentations cartographiques intermédiaires de notre continuum entre abstraction et réalisme.



FIGURE 5.19 : Extraits de l'orthophotographie et de représentations cartographiques intermédiaires de notre continuum entre abstraction et réalisme.

Conclusion Générale



Chapitre 6

Conclusion et Perspectives

L'extension annoncée de l'espace des possibles cartographiques, illustrée par une multiplication des modes de représentation du territoire, est la motivation principale de notre travail de thèse. La problématique de notre travail est de permettre la covisualisation, au sens de visualisation simultanée, de données et de représentations hétérogènes. Notre approche est guidée par l'exploration de deux représentations du territoire couramment visualisées conjointement : la carte topographique et l'orthophotographie. Notre analyse de l'usage de ces deux types de fond de carte nous permet d'identifier une utilisation croissante de fonds orthophotographiques, une augmentation de l'interaction de l'utilisateur avec la représentation, et un échec de la superposition de ces représentations par transparence. En conséquence, nous préconisons de former un continuum cartographique, c'est-à-dire un ensemble de représentations cartographiques intermédiaires, entre lesquelles le style cartographique évolue de façon continue et régulière, plutôt que de construire un milieu graphique idéal entre deux représentations hétérogènes. De tels continums permettront à l'utilisateur de se positionner entre les représentations, selon son besoin et son usage. Les objectifs de notre travail de thèse sont donc d'intégrer l'utilisation d'un fond orthophotographique au processus de conception cartographique pour former des représentations mixtes, de proposer une méthode de conception d'un continuum cartographique, et de permettre le contrôle du degré de réalisme et d'abstraction au sein du processus cartographique. La construction d'un tel chemin graphique entre une carte (résultat de nombreuses abstractions) et une orthophotographie (donnant une impression de réalisme) implique d'assurer la lisibilité de chaque état intermédiaire en adaptant la symbolisation de données vectorielles superposées à un fond orthophotographique, de fournir des transitions graphiques entre ces intermédiaires pour garantir la continuité visuelle du continuum, et de coordonner les symbolisations afin d'obtenir des représentations cartographiques homogènes en termes de degré de réalisme et d'abstraction.

Dans ce chapitre, nous décrivons les apports de ce travail en géovisualisation. Puis, nous dessinons des perspectives de travail qui permettraient d'enrichir les bases établies dans ce mémoire de thèse.

Apports

Les apports de notre travail de thèse se situent dans le domaine de la géovisualisation : ils contribuent à fournir des connaissances et des méthodes nécessaires à la conception cartographique de représentations mixtes, intermédiaires et plus ou moins réalistes. Pour cela, nous nous sommes

concentrés sur des questionnements graphiques en vue de proposer des solutions permettant un mélange visuel de données hétérogènes tout en garantissant la lisibilité des données covisualisées. Ainsi, notre travail ouvre une porte sur une sixième dimension, venant compléter les cinq dimensions fondamentales de la cartographie que sont les deux dimensions de la position planimétrique, la troisième dimension géométrique (la dimension altimétrique), le phénomène thématique représenté et le temps : le style de la représentation que l'utilisateur peut désormais choisir, modifier et parfois personnaliser.

Analyse des usages des utilisateurs en termes de visualisation du territoire

Afin de mieux comprendre les besoins de covisualisation et les usages en matière de conception de représentations cartographiques mixtes, nous avons réalisé un inventaire des représentations et applications de géovisualisation existantes dans ce domaine. Nous avons également réalisé une enquête exploratoire sur un panel de sites réalisés avec l'API du Géoportail. Ces deux approches de l'existant nous ont permis d'identifier deux fonds de carte privilégiés par les utilisateurs et fréquemment proposés au sein d'applications ou d'outils de covisualisation : la carte topographique et l'orthophotographie. Ainsi, nous identifions un triple besoin de covisualisation de ces deux représentations cartographiques :

- Visualiser conjointement une carte topographique et une orthophotographie est un besoin fondamental pour l'utilisateur de par la complémentarité de ces deux représentations du monde qui apportent une vision et des informations de natures différentes à l'utilisateur.
- Naviguer entre ces deux représentations est un besoin nécessaire à la réalisation d'un grand nombre de tâches cartographiques comme le repérage sur le territoire, la construction d'itinéraires touristiques, la saisie d'objets géographiques, etc.
- Pouvoir se positionner à l'intermédiaire de ces deux représentations est un besoin utile à la construction d'une information complexe nécessitant la prise en compte d'informations issues des deux représentations initiales.

Ces besoins de covisualisation d'une carte topographique et d'une orthophotographie sont à la fois un apport en matière d'analyse du besoin utilisateur - c'est une connaissance supplémentaire concernant l'aide à la conception cartographique - et les hypothèses de notre travail. Dans cette optique, nous revisitons la notion de covisualisation et la définissons comme étant une visualisation de données hétérogènes au sein d'une même représentation : les données sont ainsi superposées et mélangées visuellement pour former une représentation mixte.

Formalisation de connaissances et de méthodes pour la covisualisation

La proposition de méthodes pour la conception de représentations cartographiques mixtes permettant la covisualisation de données hétérogènes, notamment de données vectorielles superposées à un fond orthophotographique a engendré plusieurs apports théoriques et méthodologiques dans notre travail de thèse.

Formalisation de la notion de texture en cartographie La covisualisation de données hétérogènes implique de visualiser conjointement des symbolisations variées. De plus, l'utilisation de

la transparence autorise la visualisation de plusieurs représentations d'un même objet simultanément. C'est cet aspect particulier de la covisualisation et son pouvoir d'augmentation du réalisme de la représentation qui nous a incité à nous intéresser à la notion de texture en cartographie. La théorie de la cartographie définit une des variables visuelles, appelée la texture-structure, comme étant la répétition d'un motif selon une structure régulière. Dans le cadre de la covisualisation, nous apportons une nouvelle définition de la texture d'une symbolisation qui dépend de la combinaison des paramètres des différentes symbolisations superposées d'un même objet géographique (aplats colorés transparents, texture procédurale, extrait d'orthophotographie, etc.) et proposons une typologie de textures en cartographie (neutre, naturelle, procédurale ou mixte) pouvant être perçues comme étant plus ou moins réalistes par les utilisateurs en fonction des symbolisations mélangées (aplats de couleur, extrait d'orthophotographie, etc.).

Caractérisation graphique et utilisation de l'orthophotographie comme source d'inspiration graphique L'impact visuel de l'orthophotographie a été caractérisé par une analyse de sa composition colorée et comparé à celui d'une carte topographique. La caractérisation est réalisée en vue d'une visualisation du fond orthophotographique et la comparaison en vue d'une covisualisation de ces deux fonds. Cette caractérisation graphique montre que l'orthophotographie est un élément complexe à intégrer au processus cartographique. Pour réduire cette complexité, nous avons identifié deux caractéristiques pertinentes visuellement dans une orthophotographie :

- La texture naturelle de l'orthophotographie pourra être réinjectée dans le processus cartographique en utilisant un mode de symbolisation en noir et blanc ou le mode de combinaison *overlay*.
- Les couleurs naturelles peuvent être extraites par traitement d'image en utilisant des masques correspondants aux différents thèmes topographiques traditionnels et des méthodes de classification de la couleur, puis réinjectées dans la symbolisation des thèmes topographiques ayant servi à l'extraction.

Une méthode d'extraction de ces caractéristiques a été proposée et mise en œuvre afin de réinjecter indépendamment ces connaissances sur la structure et la perception d'une orthophotographie au sein du processus de conception cartographique. Ainsi, l'orthophotographie est utilisée comme une source d'inspiration graphique et participe à la symbolisation de la représentation en construction.

Introduction d'une méthode d'adaptation locale de la symbolisation La caractérisation graphique de l'orthophotographie nous incite également à garantir la lisibilité des objets cartographiques vectoriels qui lui sont superposés. Pour cela, nous introduisons une méthode d'adaptation locale de la symbolisation de ces objets. Cette méthode prend en compte le contexte graphique des objets à préserver, c'est à dire la couleur des objets et du fond de carte qui l'entoure. Notre méthode présente trois avantages majeurs au vu de l'état de l'art dans ce domaine :

- La définition d'une symbolisation propre à chaque objet constitue un premier pas vers une symbolisation non uniforme pour un même thème.
- Notre méthode ne dépend pas du fond utilisé, elle s'y adapte. Ainsi, il est légitime de penser que l'apport en matière de lisibilité cartographique serait reproductible avec d'autres types de fond de carte comme par exemple un fond géologique, historique ou des données lidar.

-
- Il s'agit d'une sophistication raisonnée de la théorie de la cartographie consistant à définir une symbolisation ayant un sens commun pour une famille d'objets cartographiques. En effet, l'application de cette méthode sur les contours des objets préservés n'empêche pas l'application des principes de cartographie, mais modifie légèrement la symbolisation des objets pour assurer leur lisibilité sans altérer le sens de leur symbolisation principale.

Formalisation de connaissances et de méthodes pour la navigation entre représentations

Les représentations cartographiques mixtes conçues dans notre travail de thèse ont vocation à être utilisées en tant que représentations intermédiaires entre une carte et une orthophotographie. Cela suppose de fournir des transitions entre ces représentations et d'être capable de les ordonner. En conséquence, nous introduisons une méthode d'interpolation de symbolisations et formalisons le degré de réalisme et d'abstraction afin de pouvoir l'évaluer pour une représentation intermédiaire donnée.

Introduction d'une méthode d'interpolation de symbolisations Pour permettre à l'utilisateur de passer d'un style cartographique à un autre, nous avons proposé une méthode de symbolisation visant à relier graphiquement ces styles. Cette méthode permet l'interpolation de symbolisations entre styles cartographiques exprimés dans un même jeu de paramètres. Nous nous sommes concentrés sur les paramètres utiles à notre continuum topographique (couleur, transparence, quantité de texture procédurale, etc.) et avons décrit comment interpoler ces paramètres pour générer un ensemble continu de symbolisations intermédiaires, assurant ainsi la continuité entre deux représentations successives. Notre méthode d'interpolation se décline en différentes briques élémentaires de symbolisation indépendantes les unes des autres. Cela fournit au concepteur du continuum un contrôle avancé des différents paramètres et de leur évolution graphique le long du continuum. Cet ensemble de connaissances et de méthodes permet de générer une infinité de représentations en jouant sur le paramétrage des méthodes d'interpolation mises en œuvre. L'existence de telles représentations autorise in fine la conception de différents chemins graphiques, support du continuum en construction.

Formalisation et contrôle du degré de réalisme et d'abstraction en cartographie Nous nous sommes intéressés à un aspect particulier du style topographique, son degré de réalisme et d'abstraction. Cette caractéristique du style évolue dans notre continuum pour permettre à l'utilisateur de naviguer entre une carte topographique et une orthophotographie. Pour permettre une évolution régulière de ce degré de réalisme et d'abstraction, nous avons construit un protocole de test interactif visant à estimer le degré de réalisme perçu par l'utilisateur pour différentes symbolisations de covisualisation. Ce protocole de test est reproductible, il constitue un apport méthodologique pour l'évaluation d'un aspect donné du style topographique. L'exploitation des réponses des participants nous a permis de qualifier les différentes symbolisations selon un degré perçu de réalisme et d'abstraction. Ces résultats ont été intégrés comme aide au paramétrage de notre méthode de conception de continuum cartographique pour déclencher et synchroniser les briques d'interpolation de symbolisations. Enfin, grâce à ce test utilisateur nous avons identifié des facteurs permettant le contrôle du degré de réalisme, ce qui constitue une connaissance intéressante pour la conception cartographique.

Proposition d'un outil interactif pour parcourir le continuum Nous avons implémenté nos propositions méthodologiques dans un prototype au sein de la plateforme de recherche GeOxygene, dans le langage de programmation java. Ce prototype se présente sous la forme d'un curseur interactif permettant à l'utilisateur de modifier la représentation en se positionnant le long du continuum. Cela constitue un apport méthodologique. En effet, cela nous a permis de mettre en œuvre automatiquement nos propositions de symbolisations au sein d'une même chaîne de rendu, afin de tester différentes combinaisons de nos briques de symbolisation et de proposer un paramétrage complet d'un continuum de styles entre une carte et une orthophotographie.

Perspectives de recherche

Dans ce paragraphe, nous dessinons des perspectives de recherche qui permettraient d'étendre notre travail de thèse et de l'enrichir en éprouvant sa généralité, son utilisabilité et l'efficacité cartographique de ses résultats.

Interagir avec le continuum dans des outils de multiplexing

Notre méthode de conception de continuum cartographique a pour vocation de créer un support sophistiqué pour la géovisualisation. Un prolongement naturel de ce travail est donc l'intégration des méthodes proposées au sein d'interfaces de visualisation. Les continuums cartographiques créés à partir de notre méthode de conception fournissent un ensemble cohérent de représentations cartographiques en termes d'évolution du style cartographique. En ce sens, ils ont vocation à être utilisés dans des outils de covisualisation, afin de fournir à l'utilisateur différentes visions du territoire conjointement ou simultanément. Dans le domaine de recherche en IHM, les outils de covisualisation de représentations différentes sont regroupés sous l'appellation de *multiplexing*. Ils fournissent une visualisation successive ou simultanée de plusieurs représentations au sein d'une représentation mixte interactive.

Les continuums cartographiques issus de notre travail de thèse constituent un support pertinent pour ce type d'outils interactifs. En effet, ils fournissent un ensemble lié, varié et ordonné de représentations cartographiques. Les deux premiers exemples de la figure 6.1 illustrent la covisualisation de deux et trois représentations intermédiaires issues d'un même continuum par un outil de fenêtre cartographique.



FIGURE 6.1 : Exemples d'intégration d'un continuum cartographique dans des outils de covisualisation interactifs.

Nous identifions deux pistes de recherche directement liées à l'intégration d'un continuum cartographique dans un outil de multiplexing :

- L'utilisation d'un outil de multiplexing pourrait être étendue à la conception d'une représentation cartographique mixte au sein de laquelle différentes zones seraient représentées avec des degrés différents au sein d'un même continuum. Ce type d'outil permettrait à l'utilisateur de personnaliser localement sa représentation en utilisant un ensemble de représentations cohérent. Une illustration fictive du résultat qui pourrait ainsi être obtenu est présentée en figure 6.2 à gauche.
- Les représentations cartographiques intermédiaires entre deux représentations cartographiques covisualisées pourraient être utilisées pour créer des transitions graphiques douces entre ces deux représentations. Un exemple simplifié est présenté en figure 6.2 : dans cette représentation, un outil de fenêtre cartographique est présenté, au sein duquel une zone de transition mélange par transparence progressive les deux représentations utilisées dans la zone de focus (au centre de la fenêtre cartographique) et dans la zone de contexte (à l'extérieur de la fenêtre cartographique). Cela permet déjà une transition graphique douce entre les représentations covisualisées en comparaison de celles de la figure 6.1. Cependant, l'utilisation du continuum garantirait la lisibilité des objets cartographiques ainsi que la continuité graphique au sein de cette zone de transition.



FIGURE 6.2 : À gauche, création interactive de représentations mixtes à partir du continuum. À droite, transition graphique douce par transparence.

Ces pistes de recherche sont en cours d'exploration dans le projet de recherche collaboratif MapMuxing¹, visant à la conception de techniques de multiplexing cartographique. Dans ce projet, nous utiliserons le continuum proposé au chapitre 5 comme support interactif de géovisualisation.

¹Le projet MapMuxing est soutenu par l'Agence Nationale de la recherche (ANR), sous l'appel générique 2014-2018. Son site internet est accessible à l'adresse suivante : mapmuxing.ign.fr.

Prolongement méthodologique de notre méthode de conception

Nous présentons ici des pistes de recherche à explorer pour prolonger notre méthode de conception.

Interface graphique pour la conception de continuums cartographiques Notre méthode de conception de continuum cartographique pourrait être intégrée sous la forme d'une interface graphique permettant la conception interactive de continuum cartographique. En effet, dans l'état actuel de notre prototype, le paramétrage des briques de symbolisation est effectué programmatically. Cela implique de remplir des fichiers de configuration peu intuitifs et donc peu adaptés à un expert cartographe non informaticien. Le langage graphique proposé dans ce mémoire pour représenter les éléments de symbolisation manipulés, les briques de symbolisation disponibles et le paramétrage d'un continuum complet, pourrait être mis en valeur et utilisé au sein d'un environnement de conception interactif. Cela ouvrirait de nouvelles perspectives de recherche en matière d'aide à la conception de légende, et permettrait l'analyse critique et l'utilisation de notre méthode de conception par des experts cartographes.

Sensibilité aux données et aux extrémités du continuum Nous avons mis en œuvre notre méthode pour concevoir un continuum entre une carte topographique et une orthophotographie de l'IGN. Cela nous a permis de la valider et d'obtenir des résultats innovants en termes de représentation cartographique. Pour évaluer la généralité de notre méthode, il est maintenant nécessaire de la confronter à d'autres données (issues du projet OSM ou de l'Ordnance survey par exemple), d'autres représentations cartographiques (de style artistique ou thématique), et d'autres échelles de visualisation. Cela permettrait d'évaluer la sensibilité de nos résultats vis à vis des données : sont-ils toujours valides à un autre niveau de détail ? Avec une autre structure de données ? Avec d'autres jeux de paramètres de symbolisation ou stylisation ?

Interpolation de styles Les briques d'interpolation proposées utilisent une méthode d'interpolation linéaire. Ce choix est motivé par la volonté de créer un continuum de style progressif. Cependant, rien ne prouve à l'heure actuelle que la manipulation linéaire des paramètres de symbolisation produit une évolution graphique linéaire. Cette évolution devrait donc être analysée par rapport à la perception de l'utilisateur, et comparée selon différentes fonctions d'interpolation.

De plus, notre méthode se fonde sur la capacité à exprimer les styles des extrémités du continuum avec un même jeu de paramètres. Cela soulève de nouvelles questions de recherche : peut-on toujours trouver un jeu commun de paramètres pour décrire le style de deux représentations cartographiques ? Peut-on interpoler tous les paramètres permettant de définir un style cartographique ?

Enfin, des contraintes pourraient être ajoutées à l'interpolation afin de la forcer à passer par des symbolisations pivots imposées ou à s'arrêter à des niveaux d'interpolation choisis en amont, afin de garantir la lisibilité de la représentation par rapport à d'autres caractéristiques que l'homogénéité du degré de réalisme ou d'abstraction.

L'interpolation de styles cartographiques est un des thèmes de recherche abordés par le projet de recherche collaboratif MapStyle², visant à modéliser le style cartographique et à fournir des méthodes de conception de cartes stylisées. Notre travail de thèse fait partie intégrante de ce

²Le projet MapStyle est soutenu par l'Agence Nationale de la recherche (ANR), sous l'appel CONTINT 2012-2016. Son site internet est accessible à l'adresse suivante : mapstyle.ign.fr.

projet de recherche et sera poursuivi sur les problématiques d'interpolation et d'extrapolation de styles cartographiques.

Utilisabilité du continuum proposé Nous avons validé empiriquement les différents paramétrages du continuum proposé entre une carte topographique et une orthophotographie en matière de qualité cartographique. Cependant, l'adéquation du continuum aux usages envisagés n'a pas été validée dans ce travail même si le continuum a suscité un fort intérêt de la part des potentiels utilisateurs métier auxquels il a été présenté, à l'IGN comme en dehors de l'IGN. Ainsi, il conviendrait dans le futur de tester notre continuum par rapport à différents cas d'usage métier (aide à la saisie de données géographiques ou thématiques, aide à la détection du changement (objets manquants ou nouveaux) pour l'étude de l'évolution du territoire, etc.) et pour des utilisateurs grand public (exploration d'un territoire par une interface de visualisation interactive, préparation d'un itinéraire, etc.). Pour cela, différents aspects devraient être analysés :

- l'adéquation du continuum aux différentes tâches cartographiques,
- la fréquence de navigation au sein du continuum,
- l'existence d'une représentation intermédiaire privilégiée,
- la corrélation entre une tâche cartographique et une représentation cartographique intermédiaire comme formulé par [Bernabé-Poveda et Çöltekin \[2014\]](#) à partir de représentations cartographiques présentant différents niveaux de réalisme.

Ces approches constituent autant de pistes de recherche qui permettraient de valider plus précisément l'utilisabilité du continuum proposé.

Stratégies alternatives de conception de continuums cartographiques Dans le chapitre de mise en oeuvre, nous avons proposé un exemple de continuum, ayant vocation à créer un chemin graphique progressif, c'est-à-dire présentant une évolution linéaire du degré de réalisme et d'abstraction. Nous présentons ici des stratégies alternatives qui pourraient être mises en place avec les mêmes outils méthodologiques pour construire des continuums différents.

Différenciation des chemins aller-retour Le choix des briques d'interpolation et leur ordre de déclenchement pourraient être différenciés selon la direction de navigation au sein du continuum. Cela permettrait de mettre en avant des éléments ou des caractéristiques graphiques différentes selon que l'on se déplace de l'extrémité A à l'extrémité B ou dans l'autre sens. Cependant, cela nécessite d'établir un **processus de réconciliation de configurations de briques d'interpolation** dans le cas où l'utilisateur effectuerait un demi-tour sur l'axe des styles. En effet, soit A1, A2, A3, ..., Ai, ..., A99 les représentations intermédiaires créées en partant de l'extrémité A, et B1, B2, B3, ..., Bi, ..., B99 les représentations intermédiaires créées en partant de l'extrémité B sur un continuum de 100 représentations cartographiques intermédiaires. Supposons que l'utilisateur part de l'extrémité A et se positionne dans un premier temps à la représentation intermédiaire A60. Que se passera-t-il s'il décide qu'il est allé trop loin vers l'extrémité B et qu'il rebrousse chemin de 20 étapes en direction de A ? Doit-on lui proposer la représentation cartographique A40 ou la B60 ? Est-il possible de créer un chemin graphique continu vers cette dernière représentation ? Doit-on privilégier la configuration des briques prévues pour aller de A à B, ou de B à A, ou en générer une à la volée ?

Adaptation à différents usages Afin de prendre en compte une représentation cartographique intermédiaire spécifiquement prévue pour la réalisation d'une tâche cartographique particulière (comme la saisie de données géographiques par exemple) et/ou à laquelle l'utilisateur est habitué (pour construire un itinéraire par exemple), une stratégie de conception pourrait être de contraindre la méthode de conception à passer par cette représentation, en tant que représentation cartographique pivot au sein du continuum. Pour satisfaire cette contrainte, une solution pourrait être de créer deux continuums : un entre l'extrémité A et la représentation pivot, l'autre entre la représentation pivot et l'extrémité B. Cela ouvre également un ensemble de questions de recherche : le chemin graphique global sera-t-il toujours ordonné ? Peut-on toujours ordonner un ensemble de représentations cartographiques ? Existe-il un moyen de définir si une représentation cartographique se trouve entre deux représentations données ?

Prise en compte de la perception de l'utilisateur face à une représentation avec un fond orthophotographique

Notre travail de thèse apporte des solutions graphiques d'intégration d'un fond orthophotographique au sein du processus cartographique. Celles-ci pourraient être enrichies par la formalisation de connaissances supplémentaires sur la perception et la cognition de l'utilisateur face à une telle donnée.

Perception et symbolisation localement adaptative Notre méthode de symbolisation adaptative a pour objectif d'améliorer la lisibilité des objets sur lesquels elle est appliquée. Il conviendrait d'évaluer l'apport de cette méthode de symbolisation en termes de lisibilité au regard des méthodes de symbolisation existantes. Pour cela, il serait nécessaire d'analyser différents aspects de la perception de l'utilisateur :

- est-ce que l'adaptation locale de la symbolisation permet de mieux voir les routes ?
- est-ce que la saillance des routes est mieux maîtrisée grâce à l'utilisation de cette méthode de symbolisation ?
- est-ce que l'utilisation d'une symbolisation différente pour chaque objet est perçue ? Si oui, cela gêne-t-il la compréhension de la représentation ?

Une autre piste d'exploitation de notre méthode d'adaptation locale de la symbolisation est de prévoir son application aux toponymes qui constituent un thème déterminant pour la compréhension du territoire au même titre que les routes. Cette piste de recherche a été abordée par le stage de [Escríhuela \[2013\]](#) que nous avons encadré dans le cadre de notre travail de thèse et qui visait à capter la diversité des symbolisations de toponymes utilisées dans les géoportails en vue de proposer des méthodes de symbolisation prenant en compte le contexte graphique des toponymes. La figure 6.3 présente une première proposition d'adaptation locale de la symbolisation des toponymes, qui pourrait être étendue en utilisant notre méthode sur le halo des toponymes.



FIGURE 6.3 : Exemple d'adaptation locale de la symbolisation des toponymes en utilisant la couleur inverse au contexte graphique, d'après [Escrihuela \[2013\]](#).

Ombrage et perception du relief Une limite importante à l'utilisation d'une orthophotographie conjointement à un fond cartographique est l'incompatibilité existant entre l'ombrage cartographique traditionnellement utilisé dans les cartes topographiques et l'ombrage naturel présent dans les orthophotographies. En effet, dans les cartes topographiques, l'illumination du relief est réalisée en utilisant les paramètres d'éclairage d'un soleil fictif venant du nord-ouest, tandis que l'ombrage naturel des orthophotographies vient globalement du sud dans l'hémisphère nord. La figure 6.4 illustre ce phénomène d'inversion, en mettant en évidence le même sommet sur les deux représentations. Cela permet d'observer que l'ombrage cartographique provient du nord-ouest tandis que l'ombrage naturel contenu dans cette orthophotographie provient du sud-est.



FIGURE 6.4 : Ombrages cartographiques et naturels inversés.

Cette source d'incompatibilité du fond orthophotographique est identifiée comme un obstacle à son utilisation au sein du processus cartographique par plusieurs travaux de recherche [Patterson, 2002; Jenny *et al.*, 2012]. Cette intuition théorique est confirmée empiriquement par les travaux de Bernabé-Poveda et Çöltekin [2014] qui démontrent l'existence d'un phénomène d'inversion du relief, notamment sur les orthophotographies, et la quantifie selon le profil de l'utilisateur et la localisation sur le globe (hémisphère nord ou sud).

Dans notre travail de thèse, nous n'abordons pas la conception d'un ombrage orthophotographique traitée par ailleurs dans les travaux de Bernabé-Poveda *et al.* [2011] visant à rehausser le relief dans une orthophotographie. Cependant, nous proposons des méthodes de symbolisation vectorielles, en vue de traiter indépendamment les couches de données. Ainsi, l'ombrage cartographique pourra être intégré ou retiré selon que la représentation intermédiaire en construction contient un fond cartographique ou orthophotographique. De même, si l'on disposait d'un ombrage orthophotographique comme ceux issus des travaux de Bernabé-Poveda *et al.* [2011], il pourrait lui aussi être intégré ou retiré en fonction du type de fond de carte utilisé. Ces pistes d'amélioration du continuum sont directement liées à l'utilisation d'un fond orthophotographique dans l'une des extrémités, et permettraient sûrement une amélioration substantielle de la perception du relief au sein des représentations cartographiques intermédiaires.

Cognition et compréhension de la donnée orthophotographique Enfin, la prise en compte de l'utilisateur dans l'intégration de fond orthophotographique implique de mieux évaluer sa compréhension du territoire au travers de la donnée orthophotographique. Cela suppose de :

- décrire plus précisément la nature de l'information contenue dans une orthophotographie et la pertinence de cette information pour l'utilisateur : quelle est l'importance de la couleur, de la teinte ou de la texture naturelle des objets représentés dans la compréhension de l'utilisateur à la lecture d'une orthophotographie ?
- déterminer ce qui peut être considéré comme un signe graphique au sein d'une orthophotographie : qu'est-ce qui fait sens dans une orthophotographie ? Est-ce plutôt un pixel, un groupe de pixel ?
- analyser l'impact visuel engendré par l'intégration d'une orthophotographie : l'intégration d'un fond orthophotographique rend-il la représentation plus efficace ? plus complexe ?

Chacun de ces questionnements ouvre des pistes de recherche qu'il serait utile de mener en collaboration avec des chercheurs dans le domaine de la cognition et de la représentation mentale du territoire à partir de représentations graphiques.

Adaptation du prototype à une architecture client-serveur

Les usages identifiés en partie I pour notre méthode de conception de continuum impliquent l'intégration du continuum conçu au sein d'une interface de géovisualisation en ligne permettant à l'utilisateur d'interagir avec ledit continuum cartographique. En conséquence, nous proposons des adaptations de notre prototype (Cf. §5.2) à un fonctionnement client-serveur (Cf. figures 6.5 et 6.6). Ces architectures sont directement inspirées des deux architectures présentées et comparées par Jenny *et al.* [2015]. Nous avons mis en place la première de ces deux architectures dans le cadre d'un séjour scientifique durant notre travail de thèse en l'appliquant à un autre objectif de conception cartographique.³

Nous présentons ici des adaptations possibles pour mettre en place notre méthode de conception au sein d'une interface de géovisualisation en ligne ayant une architecture client-serveur, similaire à celle du géoportail de l'IGN par exemple. Dans nos propositions d'adaptation de l'architecture de notre prototype, comme dans notre prototype actuel, c'est l'interaction de l'utilisateur qui définit la représentation en cours de visualisation. L'enjeu est donc de déterminer la bonne implémentation des méthodes de rendu pour générer les représentations cartographiques intermédiaires tout en assurant une navigation fluide entre ces représentations. Où doit-on plutôt intégrer les briques de symbolisation proposées ? Quel composant de l'architecture doit être en charge de réaliser le rendu de la représentation ?

Conception cartographique côté serveur avec génération précalculée de l'ensemble du continuum Notre première proposition d'adaptation à une architecture de type client-serveur privilégie la réalisation du processus de conception des représentations cartographiques du côté serveur (Cf. figure 6.5). Cette architecture présente l'avantage de pouvoir réaliser un maximum d'étapes de pré-traitement en amont de la consultation du continuum cartographique, ce qui permettrait une navigation totalement fluide de l'utilisateur. En effet, cela impliquerait de générer à l'avance un ensemble de représentations cartographiques tuilées correspondant à chaque position dans le continuum. Les interactions de l'utilisateur provoqueraient une navigation au sein de chaque représentation (lorsqu'il se déplace ou zoome dans l'espace géographique) ou bien d'une représentation tuilée à une autre (lorsqu'il parcourt le continuum par l'utilisation d'un curseur par exemple). Cependant, concevoir l'ensemble des représentations cartographiques intermédiaires n'est pas envisageable dans le cas d'un passage à l'échelle sur un territoire plus vaste. Cela impliquerait un temps de calcul trop important. De plus, générer au préalable l'ensemble des représentations cartographiques intermédiaires proposées à la consultation empêcherait l'utilisateur de personnaliser le continuum en modifiant la sélection des thèmes cartographiques constituant les extrémités par exemple.

³Un des objectifs de ce séjour était de créer une carte selon un point de vue plus naturel que celui des cartes topographiques, selon un plan oblique [Jenny et Patterson, 2007]. Pour cela, une architecture client-serveur a été mise en place et exploitée pour créer une carte aquarelle en plan oblique. Cette carte a été réalisée en utilisant la carte aquarelle de l'agence Stamen [Watson, 2012] et est consultable en ligne à l'adresse suivante : <http://cartography.oregonstate.edu/CrinkledWatercolor.html>.

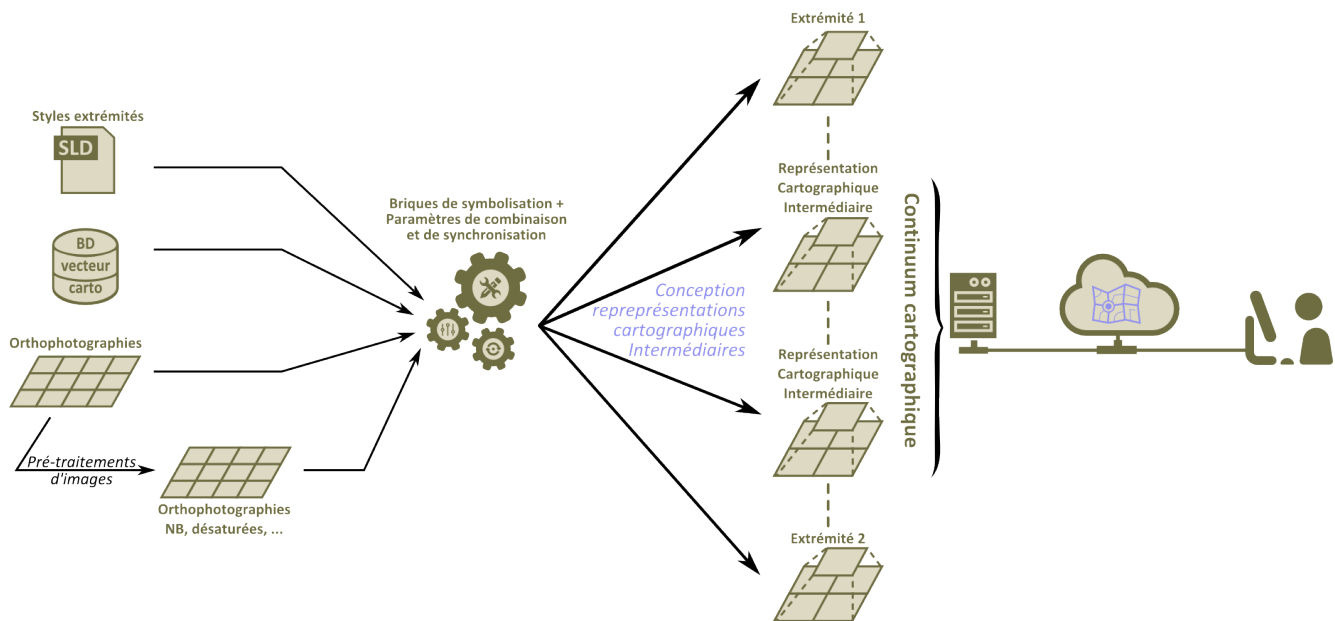


FIGURE 6.5 : Architecture client-serveur avec processus cartographique précalculé côté serveur.

Conception cartographique côté client avec génération à la volée des représentations intermédiaires côté client Notre seconde proposition d'architecture client-serveur privilégie une conception à la volée des représentations cartographiques intermédiaires côté client. Elle est présentée en figure 6.6. Cette architecture permet une personnalisation des données par l'utilisateur qui pourra sélectionner les données qui lui sont utiles parmi celles nécessaires à la constitution du continuum qu'il visualise. De plus, cette architecture réduit le volume de données à produire et à stocker en amont de la visualisation, c'est-à-dire les données vectorielles cartographiques et les données orthophotographiques tuilées. En effet, la représentation cartographique intermédiaire choisie par l'utilisateur est générée à la volée : il n'est donc pas nécessaire de générer à l'avance et de stocker un ensemble de représentations tuilées. La génération à la volée des représentations cartographiques intermédiaires pourra être effectuée en exploitant la puissance de la carte graphique de l'ordinateur de l'utilisateur. En effet, les technologies récentes de rendu comme le langage de programmation WebGL⁴ permettent l'affichage, la création et la gestion dynamique d'objets graphiques 3D. Le langage WebGL est implémenté progressivement par l'ensemble des navigateurs internet et fournit un ensemble de programmes élémentaires et extensibles, appelés *shaders*, qui sont exécutés par le processeur graphique de l'ordinateur de l'utilisateur. Ainsi, nos méthodes de symbolisation pourraient être transmises en même temps que les données géographiques et les informations de symbolisation au navigateur internet de l'utilisateur sous la forme de *shaders* permettant de réaliser le rendu des représentations cartographiques intermédiaires formant le continuum visualisé.

⁴Le document de travail de la future version de la norme *WebGL 2 Specification* du W3C, réalisé par le groupe Khronos, est consultable à l'adresse suivante : <https://www.khronos.org/registry/webgl/specs/latest/2.0>.

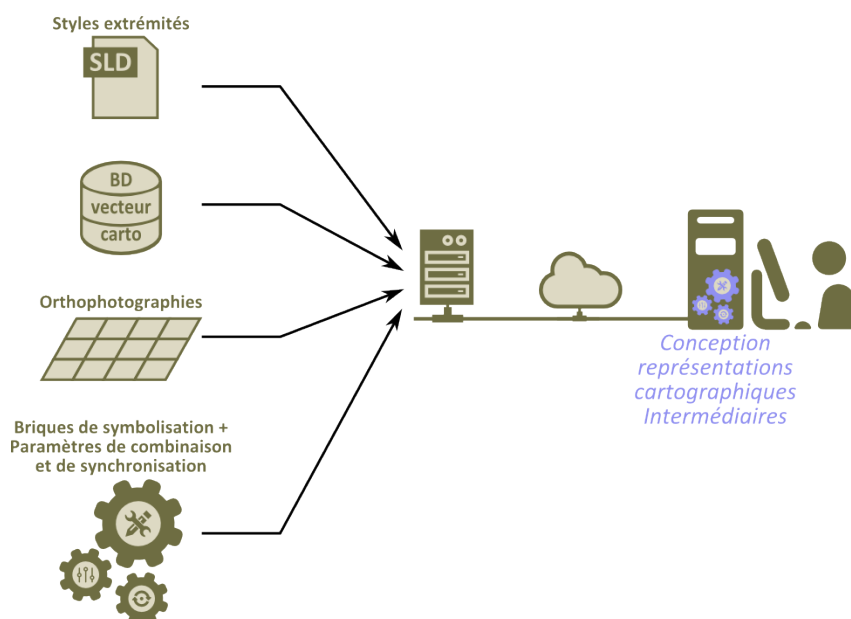


FIGURE 6.6 : Architecture client-serveur avec processus cartographique à la volée côté client.

Conception cartographique côté serveur avec génération à la volée des représentations intermédiaires

Notre dernière proposition d'adaptation à une architecture client-serveur est un compromis entre les deux premières propositions exposées aux paragraphes précédents. Comme dans la première proposition, le rendu est calculé du côté serveur. Et comme dans la deuxième proposition, c'est l'interaction de l'utilisateur qui déclenche à distance la génération à la volée des représentations cartographiques intermédiaires (Cf. figure 6.7). Cette architecture présente les avantages combinés des deux premières propositions : le processeur de l'ordinateur côté client est moins sollicité puisqu'il ne produit pas le rendu et les prétraitements nécessaires ne sont pas trop importants côté serveur puisque la génération est effectuée à la volée. Cependant, cette architecture présente un risque : elle implique potentiellement un grand nombre de traitements de rendu côté serveur en cas de forte fréquentation du portail.

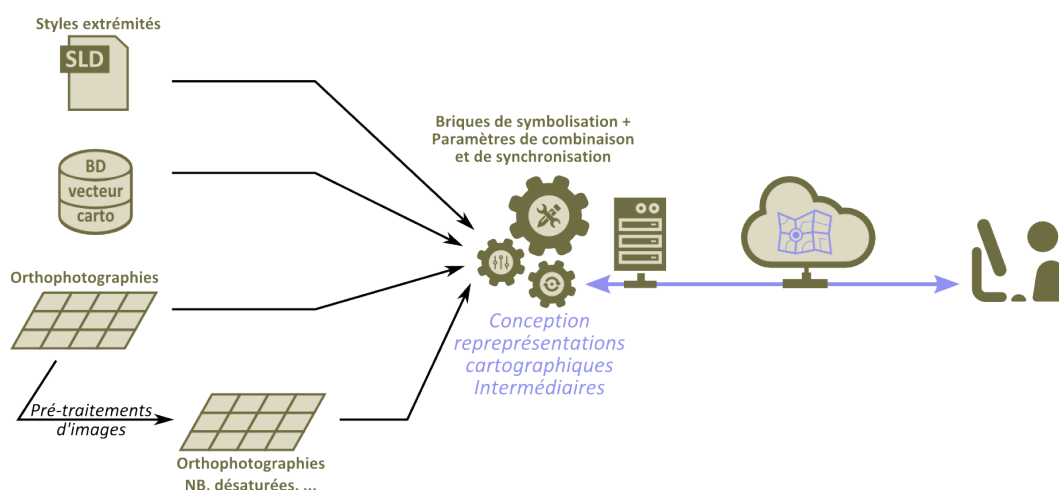


FIGURE 6.7 : Architecture client-serveur avec processus cartographique à la volée côté serveur.

Annexes



Annexe A

Caractérisation des données géoréférencées

A.1 Données vecteur ou données raster ?

Une première caractéristique des données géoréférencées est le type de géométrie utilisé pour stocker la position et la forme des objets géographiques. Cette géométrie peut être de type vectoriel ou de type raster comme l'illustrent les figures [A.1](#) et [A.2](#).

Les données de type vectoriel fournissent une description de la géométrie de l'objet (son centre, son axe, son contour, etc.) à partir de primitives géométriques (un point, une ligne, une courbe, une surface, un volume, etc.) tandis que les données de type raster décrivent la surface du territoire sous la forme d'une grille dans laquelle chaque élément, appelé *pixel* pour "picture element", porte une ou plusieurs informations sur la nature de l'objet se trouvant à cet endroit. En conséquence, les phénomènes géographiques continus (comme l'altitude, la température, etc.) seront plutôt représentés par des données de type raster (Cf fig. [A.2](#)), tandis que les objets géographiques délimités dans l'espace (comme les routes, les bâtiments, etc.) seront plutôt représentés par des données vectorielles (Cf fig. [A.1](#)). Ces deux types de géométrie permettent des analyses spatiales sensiblement différentes : les données vectorielles sont plus adaptées à répondre à des questionnements du type "*Où se trouvent les objets de telle nature (les lacs par exemple) ?*", tandis que les données raster sont plus adaptées à répondre à des questionnements du type "*Quel est la nature de l'objet se trouvant à tel endroit ?*". Le choix d'un type de géométrie est donc déterminant dans la modélisation des données géographiques et dans le traitement et la représentation qui en seront faits. Les données de type vectoriel associent des attributs sémantiques à la description géométrique de chaque objet. Ces attributs renseignent sur la nature des objets qui sont enregistrés. Par exemple, un attribut peut être dédié à l'enregistrement du type de végétation d'une forêt (feuillus, conifères, etc.) ou le type de revêtement d'une route (empierrée, carrossable, etc.). De plus, les données vectorielles sont généralement organisées par thèmes (la végétation, le routier, le bâti, etc.), sous la forme de différents fichiers de données à utiliser comme des couches superposables dans un système d'information géographique (SIG).

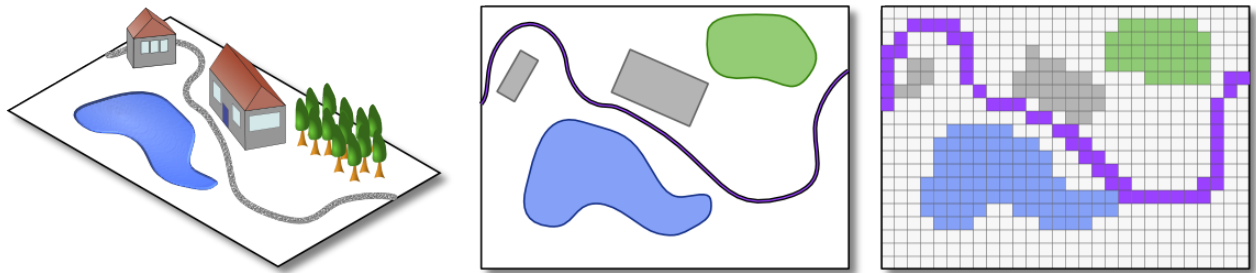


FIGURE A.1 : Différents types de géométrie pour modéliser des objets géographiques délimités. À gauche : Le monde réel tel qu'il peut être perçu. Au centre : Une modélisation vectorielle. À droite : Une modélisation raster.



FIGURE A.2 : Différents types de géométrie pour modéliser un phénomène géographique continu, le relief. À gauche : Le relief tel qu'il peut être perçu. Au centre : Une modélisation vectorielle du relief, par des courbes de niveaux. À Droite : Une modélisation raster du relief, par un Modèle Numérique de Terrain (MNT) en niveaux de gris.

Le mode raster est également celui des images en général, et notamment celui des photographies aériennes et satellitaires. Ces images particulières sont capturées par des caméras¹ qui enregistrent l'énergie électromagnétique reçue dans les longueurs d'onde visibles par l'œil humain, et parfois dans le domaine de l'infrarouge. Cette énergie électromagnétique est enregistrée dans trois canaux différents (quatre dans le cas d'une acquisition avec infrarouge) afin de reproduire le mécanisme de la vision humaine : un canal pour le rouge, un canal pour le vert et un canal pour le bleu. Ces trois informations peuvent ensuite être ré-assemblées pour créer une image en couleur (Cf. figure A.3), en suivant le même principe que celui de la vision humaine.

¹Par le passé, les caméras étaient argentiques : elles enregistraient l'information sur des bandes magnétiques. Aujourd'hui, les caméras de prise de vue, comme celle des satellites d'observation de la Terre, sont numériques : elles enregistrent l'information directement sous la forme de données sur un disque dur.

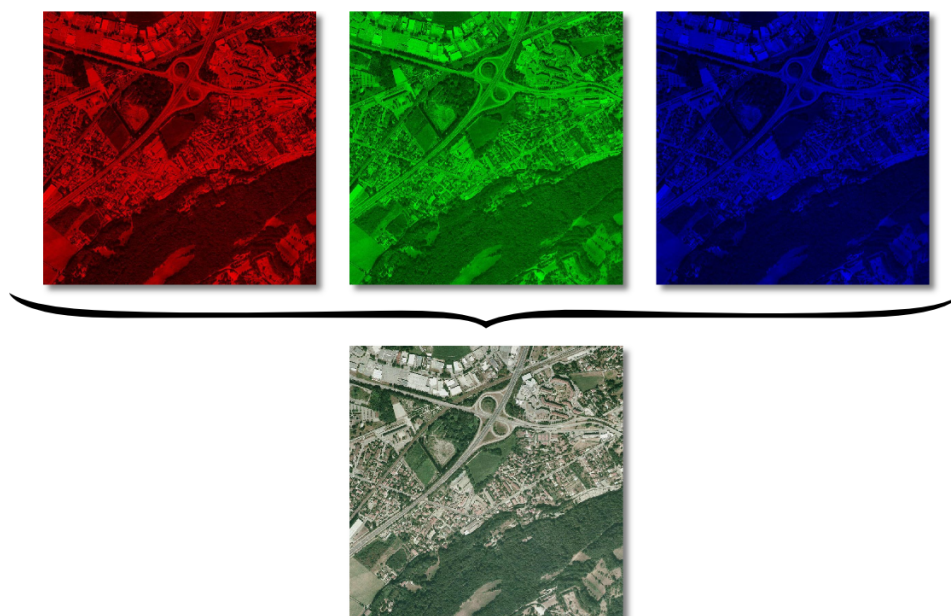


FIGURE A.3 : Assemblage des canaux RVB pour former une image en couleur.

Les cartes numériques peuvent également être présentées au format raster. Elles peuvent être le résultat d'un processus de numérisation d'une carte papier par le biais d'un scanner numérique, ou le résultat de la rasterisation d'une carte numérique produite à partir de données vectorielles. Dans les deux cas, les couches de données sont fusionnées en une seule couche image. Il n'est plus possible d'extraire des objets géographiques par analyse spatiale ou attributaire. La figure A.4 présente un extrait de la base de données SCAN 25 de l'IGN, issu de la numérisation des séries bleue et TOP25 des cartes papier au 1/25 000^{ème} de l'IGN.



FIGURE A.4 : Extrait du SCAN 25.

A.2 Données géographiques ou cartographiques ?

Une seconde caractéristique des données topographiques disponibles pour concevoir des représentations cartographiques est de savoir si ce sont des données géographiques ou cartographiques. En effet, ces deux types de données sont conçues selon différents objectifs, impliquant des différences de qualité géométrique dans la description de la position et de la forme des objets modélisés. Les données géographiques sont conçues dans le but de décrire le plus précisément possible les objets géographiques, afin de permettre des analyse spatiales de qualité tandis que

les données cartographiques sont destinées à permettre une représentation la plus lisible possible à une échelle donnée.

Les données cartographiques vectorielles peuvent être obtenues par numérisation (et saisie manuelle) des cartes papiers ou à partir de données géographiques par le biais de processus automatiques de généralisation cartographique². Les opérateurs de généralisation cartographique dont on peut trouver une classification dans [Mustière, 2001, p30], ont pour effet de déplacer et déformer les objets afin d'en assurer la lisibilité. La géométrie des objets cartographiques n'est donc pas la plus précise possible en terme de position ou de forme comme l'illustre la figure A.5, mais bien la plus adaptée à une représentation à une échelle donnée.

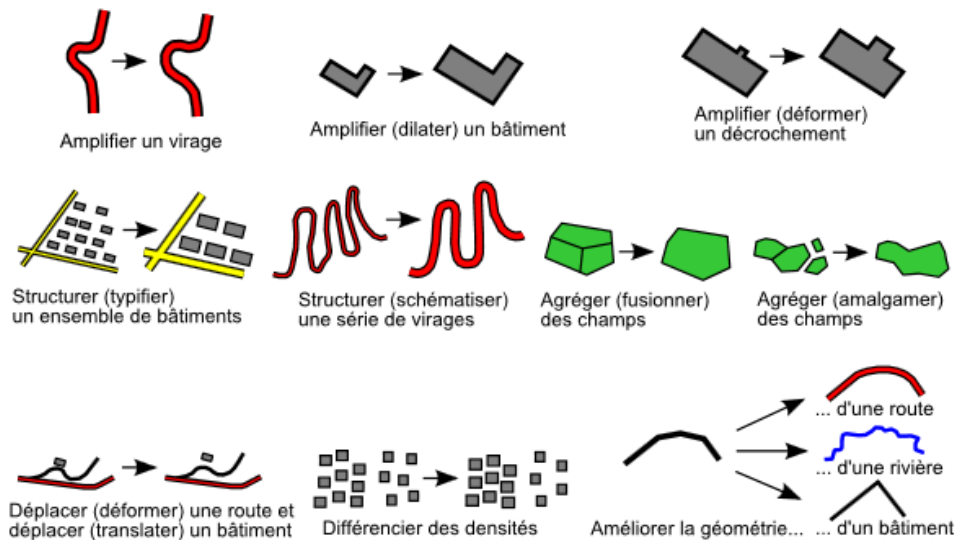


FIGURE A.5 : Exemples d'opérateurs de généralisation ayant pour objectif de caricature la forme, la distribution, ou le positionnement des objets, issus de [Gaffuri, 2008], d'après [Mustière, 2001]

Les deux images de la colonne de gauche en figure A.6 illustrent les différences de géométrie pouvant exister entre une base de données géographique et une base de données cartographique sur une même zone en juxtaposant deux bases de données de l'IGN : la BD TOPO (Base de données géographiques du RGE) et la base de données conçue pour la réalisation du SCAN Express 25®.

De plus, il est important de noter que la distinction entre données géographiques et cartographiques est indépendante de la distinction entre données vecteur et raster. En effet, il existe des données géographiques au format vectoriel (comme la BD TOPO25®) et au format raster (comme la BD ORTHO®) de même qu'il existe des données cartographiques au format vectoriel (comme la BD du Scan Express 25®) et au format raster (comme le Scan Express 25®), comme l'illustre la figure A.6.

²Plusieurs processus de généralisation ont par exemple été élaborés dans le cadre des travaux du laboratoire COGIT sur l'automatisation du processus de conception cartographique ([Ruas, 1999], [Mustière, 2001], [Duchêne, 2004], [Gaffuri, 2008], [Touya, 2011]).

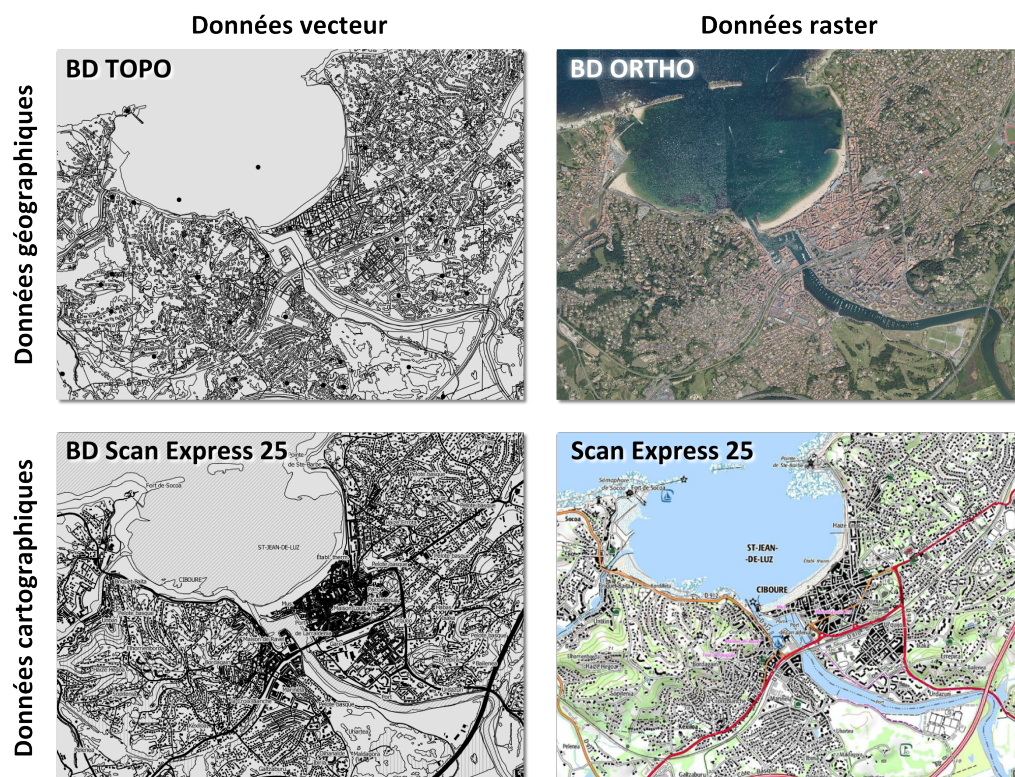


FIGURE A.6 : Complémentarité des caractéristiques géométriques des données topographiques

Enfin, nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que les bases de données cartographiques vectorielles à grande échelle ne sont pas courantes. D'une part, les processus automatiques de généralisation cartographique sont le résultat de travaux de recherche récents et ne sont par nécessairement encore utilisés dans les chaînes de production cartographique des grands producteurs de cartes topographiques. D'autre part, l'utilisation de processus automatiques de généralisation cartographique pour la création de représentations cartographiques à partir d'une base de données géographique peut être seulement une étape intermédiaire donnant lieu uniquement à la création d'une carte raster numérique, sans pour autant générer une base de données cartographiques. À l'IGN, un projet d'automatisation express du processus de rédaction cartographique a donné lieu à la création d'une base de données cartographique vectorielle à grande échelle. Cette base de données est utilisée pour la production d'une base de données cartographique raster, illustrée à la figure ??, alliant une bonne actualité des données et une grande qualité de rédaction cartographique.

Annexe B

Enquête Géoportail

Dans cette annexe, nous dressons une liste des sites internet que nous avons étudiés pour analyser les usages de fonds cartographiques et orthophotographiques par le biais de l'API du Géoportail. Puis, nous présentons les informations que nous avons collectées concernant ces sites internet.

B.1 Liste des sites étudiés

Nom du site	Adresse URL
Vinogéo	http://www.vinogeo.fr/vinogeo.php?pays=PAYS_0001#
Planorando	http://www.planorando.com/
Utagawa	http://www.utagawavtt.com/gmap/geoportail-carte-generale-topos-vtt
Géofoncier	http://www.geofoncier.fr/cartto/
Refuges info	http://www.refuges.info/nav.php
Visu GPX	http://www.visugpx.com/editgpx/
Openrunner	http://www.openrunner.com
Scrut GPX	http://clic0.free.fr
Formation en picardie	http://offredeformation.picardie.fr
Géocatalogue	http://www.geocatalogue.fr/
Rando GPX	http://www.randogps.net/
GPX View	http://www.gpx-view.com
Rando VTT	http://www.randovtt.com
Cent cols	http://www.centcols.org/util/geo/visuGP.php?code=FR-38-1398
Plani cycles	http://www.plani-cycles.fr/
Wiki Maginot	http://www.wikimaginot.eu
INPN	http://inpn.mnhn.fr
VisoRando	http://www.visorando.com/chercher-randonnee.html
Parc naturel de Chevreuse	http://www.parc-naturelchevreuse.fr/balade-autour-deparis.html#balades.titre
Parc naturel de Chevreuse	http://www.parc-naturelchevreuse.fr/index.php?id=593&plan=27
Atlas des patrimoines	http://atlas.patrimoines.culture.fr

INRAP	http://www.inrap.fr/archeologie-preventive/Sitesarcheologiques/p-30-Rechercher-un-site.htm
IGN - SGN	http://geodesie.ign.fr/fiches/
Trobreiz	http://trobreiz.com/programme_fraternite/
Vtt Track	http://www.vttrack.fr/
Chemineur	http://chemineur.fr
Télécom Bretagne	http://www.telecombretagne.eu/ecole/campus_de_brest/geoportail_brest/index.php
Géo-map	http://www.mides.fr/geocaching-sur-geoportail-les-dernieresplaces
Equi pyrénées	http://www.equipyrene.org/ign2/TP_carte2.php?iti=CDB_FR.gpx
Elysée	http://www.archives.elysee.fr/president/les-dossiers/lesdossiers.5.html
Equi Breizh	http://www.cdte56.fr/rando_boucle/
ENSG	http://www.ensg.eu/Plan-d-acces
Pic et col	http://j.garlenq.free.fr/spip.php?article5599
Lyon topo VTT	http://lyontoposvtt.free.fr/lyonnais-topos.htm
Traversée des Alpes	http://www.grande-traversee-alpes.com/gta-gr5/preparezvotre-itinerance/les-etapes?troncon_id=44
Camping frankrijk	http://www.campingfrankrijk.nl/campingluchtfoto.asp?CampingID=456736
–	http://www.victorb.fr/
–	http://www.valroc.net/html/geo_sentiers21/sage.html
–	http://cbnbp.mnhn.fr/cbnbp/carto/geoportail/viewer_releve.jsp?idSite=20030224124911les
–	http://www.montagne38.fr/geolocalisation/cartes.php
–	http://www.topoguidepd1.fr/85.html
–	http://www.calculitineraires.fr/ign.php
–	http://www.mdb-idf.org/spip/spip.php?article872
–	http://www.ententelot.fr/
–	http://www.geml.fr/observations/08/index.php

B.2 Informations collectées

Information collectée	Réponses possibles
Fond de carte utilisé ?	carte / photo / les 2 / aucun
Paramétrage de la carte	
Est-elle proposée ? (présente dans le bloc de couche ou ajoutable)	oui / non
Est-elle visible ? (case cochée dans bloc de couche)	oui / non
Transparence de la couche Carte	valeur

Paramétrage de l'orthophoto Est-elle proposée ? (présente dans le bloc de couche ou ajoutable) Est-elle visible ? (case cochée dans bloc de couche) Transparence de la couche Ortho	oui / non oui / non valeur
Affichage du fond Quel fond dessous ? Est-il possible de mélanger les deux fonds ? Est-il possible de changer de fond ?	Carte / Photo / Rien oui / non oui / non
Présence des outils de l'API Boîte à Outils (navigation, ...) Bloc de couches ?	réduit / étendu / non réduit / étendu / non
Données Couches de l'API proposées ? Données ajoutées par le webmaster Format des données ajoutées par le webmaster Mode d'implantation des données ajoutées par le webmaster Données ajoutables par l'utilisateur Format des données ajoutées par l'utilisateur Mode d'implantation des données ajoutées par l'utilisateur Quelle Carte ? Centre de la carte Taille de la fenêtre cartographique Taille de la fenêtre cartographique Echelle	Liste des couches proposées Liste des données ajoutées par le webmaster Format des données ajoutées point / ligne / surface point / les 3 Faire une liste Format des données ajoutées point ligne surface point, ligne les 3 Plan SCAN25 / SCAN50 / SCAN100 / SCAN Regional / SCAN500 / SCAN1000 / Europe Politique / Monde / Adaptative / Aucune Coordonnées Hauteur Largeur Valeur
Informations sur le site Nom du site Adresse URL Auteur Organisme Description Thématique principale Public Webmaster	Développement Durable, Rando, Rando VTT, Rando Cyclisme, Rando pédestre, Rando équestre, Enseignement , Histoire, Immobilier, Transport, Traces, Culture, Géomatique, Tourisme Grand public / Professionnel / les 2 Amateur / Professionnel / Asso / Collaboratif

Interactivité Tâche cartographique Visualisation de données externes au Géoportail Peut-on cliquer sur des objets, et faire afficher des popups ? Peut-on modifier la transparence des couches ? Peut-on modifier l'ordre des couches ? Peut-on afficher/cacher les couches une à une ? Peut-on modifier la taille de la carte ? Peut-on ajouter des objets ? Peut-on importer des données ? Peut-on exporter la carte ? Portail ? Fréquentation du site Utilisation du site	Visualisation / Co-visualisation / Conception de carte / Planification d'itinéraire / Localisation de ponctuels / Recherche d'informations / Recherche d'informations avec conception de cartes Aucune / 1 point / 1 couche de points /des couches points / 1 couche de lignes / des couches de lignes / des couches de polygones / des couches / des couches + raster non / clic / clic + popup / survol + popup oui / non oui / non oui / non / switch Ortho Carto / oui + switchFond non / agrandir / rétrécir / les 2 point d'intérêt / ligne / polygon / les 3 / non / édition oui / non / symboliser carte données non portail / site monotheme / catalogue Nombre de sessions ouvertes en janvier 2012 Nombre de tuiles chargées en janvier 2012
Informations complémentaires Technologie Présence d'une légende Cartographie thématique ? Symboles proportionnels ?	Javascript / Flash Statique / Dynamique / Non oui / non oui / non

Annexe C

Test utilisateur sur la perception du degré de réalisme et d'abstraction

Le test utilisateur présenté dans cette annexe vise à évaluer les degrés de réalisme et d'abstraction perçus par les participants. Ce test s'appuie sur des échantillons de symbolisations différentes appliquées à des données géographiques de végétation.

Le test a été diffusé sur Internet, sur une période de trois mois (du 1^{er} Juillet au 30 Septembre 2014). Des appels à participation ont été lancés sur des forums et listes de diffusion en géomatique, géographie et cartographie, ainsi qu'à des contacts personnels. Entre autres, le test a été diffusé sur des réseaux professionnels en géomatique comme la liste de diffusion francophone Geotamtam, sur le forum Georezo¹, sur la revue de presse du site web Geotribu² et sur Twitter³.

Cette annexe décrit le protocole de test (Cf. §C.1), présente une analyse du profil des participants au test (Cf. §C.2, ainsi que les réponses aux questions et une analyse de ces résultats (Cf. §C.3). L'interprétation qui en est faite dans notre travail de thèse est détaillée au chapitre 4.3.

C.1 Protocole de test

Le test est construit sous la forme d'un questionnaire interactif ouvert à tous sur Internet⁴. En conséquence, les participants répondent aux questions par le biais de leur navigateur internet. Plusieurs biais ne sont pas contrôlés du fait de ce type de diffusion. Notamment, le type d'affichage sur l'écran des participants n'est pas contrôlé : la gestion des couleurs ou la taille de l'écran varient par exemple d'un participant à un autre. Cependant, les applications de nos travaux ont

¹Le forum du portail francophone de la géomatique GeoRezo est accessible à l'adresse suivante : georezo.net/forum. L'appel à participation sur ce forum est consultable à l'adresse suivante : georezo.net/forum/viewtopic.php?id=92853&hl=co-visualisation.

²Le site web Geotribu regroupe des revues de presse dédiées au domaine de la géomatique, des tutoriels et articles techniques, etc. Il est accessible à l'adresse suivante : www.geotribu.net. La revue de presse dans lequel se trouve l'appel à participation au test est consultable à l'adresse suivante www.geotribu.net/node/737.

³L'appel à participation lancé sur Twitter est consultable à l'adresse suivante : <https://twitter.com/CartHoarau/status/485059252592324608>.

⁴Le test utilisateur était consultable à l'adresse suivante : www.geopixi.fr/enquete_covisualisation.

vocation à être utilisables par le grand public, sous la forme d'outils interactifs au sein d'un géoportail ou d'une application SIG. La variabilité des conditions d'affichage du test reflète donc celle des applications finales visées.

C.1.1 Questionnaire interactif

Les participants au test ont répondu à un ensemble de questions interactives. Ces questions visent toutes à évaluer un aspect de la perception des degrés de réalisme et d'abstraction des participants, en leur faisant manipuler, choisir ou construire des représentations cartographiques. Notre approche générale est de permettre à l'utilisateur de qualifier des représentations selon un critère graphique (ici les degrés de réalisme et d'abstraction) en lui faisant réaliser des tâches interactives le plus intuitives possibles.

Le questionnaire interactif proposé aux participants présente trois grands types de questions interactives. Le premier type de questions consiste à demander à l'utilisateur de **choisir une représentation ou une symbolisation** parmi plusieurs représentations selon un objectif donné. La figure C.1 présente deux exemples de choix proposés aux participants du test. A gauche, l'utilisateur doit sélectionner une des deux représentations selon un critère graphique (ici celle qui est la plus photoréaliste). A droite, l'utilisateur doit sélectionner une des deux représentations disponibles et la faire glisser pour créer un chemin graphique (ici un continuum selon le degré de photoréalisme).

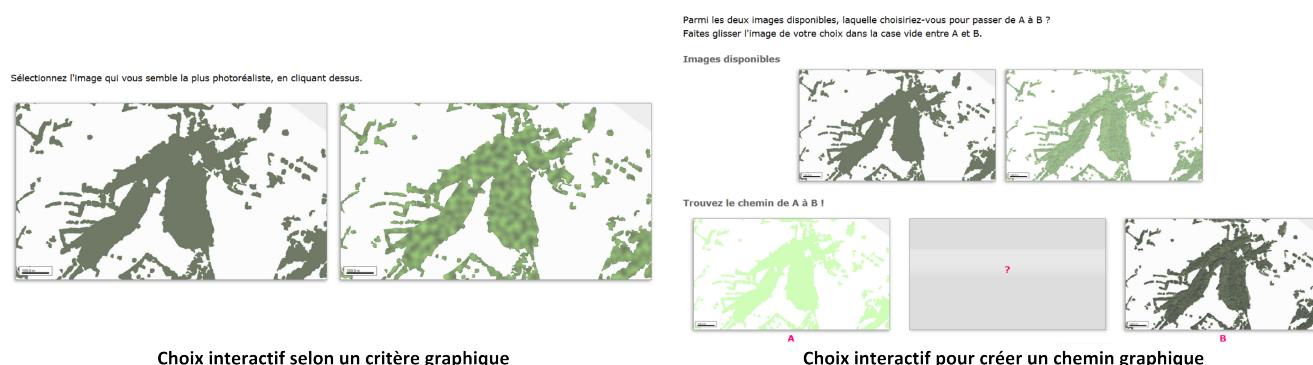


FIGURE C.1 : Choix interactif d'une représentation cartographique.

Le deuxième type de question interactive consiste à **faire ordonner à l'utilisateur des images** (symbolisations ou représentations cartographiques complètes) en vue de lui faire créer un continuum selon un critère graphique (dans notre cas, le degré de photoréalisme). Plusieurs images sont donc disponibles et l'utilisateur doit les faire glisser et les déposer dans les cases prévues pour créer un continuum cartographique (Cf. figure C.2). Pour cela, il peut, dans un premier temps, les déplacer dans la page pour les rapprocher, les comparer et créer des ordres graphiques partiels, avant de créer un continuum complet.

Enfin, le troisième type de question interactive proposé dans notre test consiste à permettre à l'utilisateur de **paramétrer une symbolisation** selon un objectif donné. Pour cela l'utilisateur dispose d'un curseur lui permettant de modifier une seule des symbolisations au sein d'une représentation cartographique complète. La figure C.3 illustre trois états possibles d'un curseur permettant à l'utilisateur de modifier une symbolisation (ici celle de la végétation) au sein d'une représentation cartographique intermédiaire.

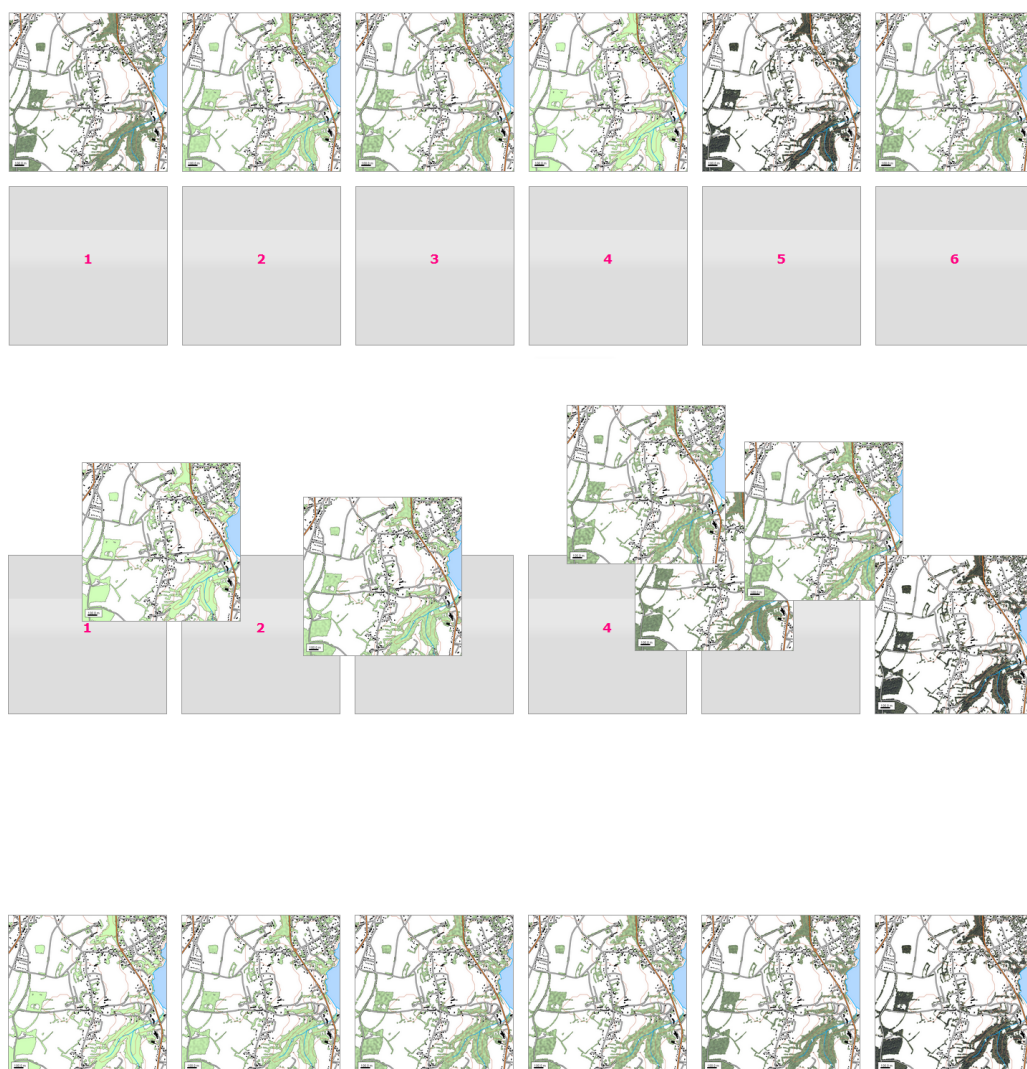


FIGURE C.2 : Ordonnancement interactif d'un ensemble de symbolisations

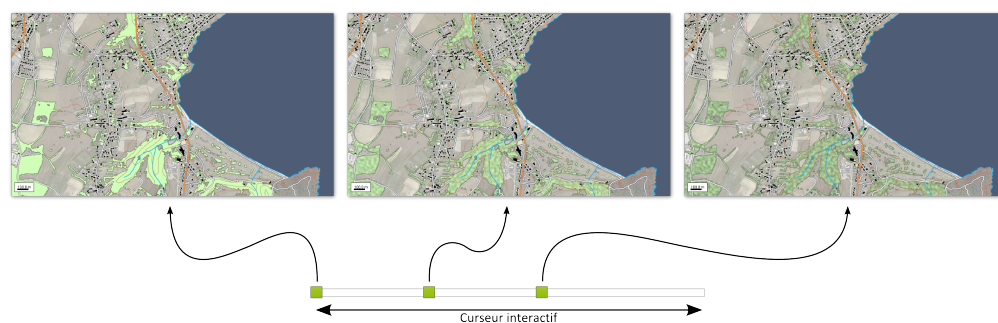


FIGURE C.3 : Paramétrage interactif d'une symbolisation au sein d'une représentation

Enfin, les temps de réponse aux questions ont été enregistrés pour estimer les difficultés rencontrées pour réaliser les tâches interactives et répondre aux questions. Pour cela, l'heure précise de validation de chaque question a été enregistrée.

C.1.2 Matériel de test

Dans ce paragraphe, nous présentons le matériel constitué de visuels utilisés et construits spécialement pour le test, et des questions posées aux participants.

Visuels de support Un ensemble de visuels a été construit spécialement pour le test. Pour chaque visuel, une symbolisation a été appliquée à une couche de données géographiques de végétation. La figure C.4 présente cette couche de données, et la figure C.5 décrit les paramètres graphiques utilisés pour créer les visuels, ainsi qu'un échantillon de ces symbolisations.



FIGURE C.4 : Données de végétation utilisées pour construire les visuels du test.

Texture	Couleur	Mode de combinaison	Symbolisation
Aplat	Vert moyen	Aucune	
Perlin	Vert ortho / Vert moyen	Aucune	
Ortho	Vert ortho	Transparence	
Poncifs	Vert IGN	Aucune	
Perlin	Vert IGN / Vert ortho	Aucune	


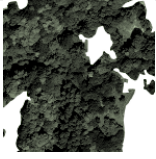


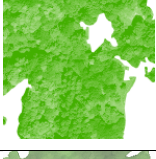




Texture	Couleur	Mode de combinaison	Symbolisation
Ortho	Vert moyen	Transparence	
OrthoNB	Vert ortho	Overlay	
Aplat	Vert IGN	Aucune	
Ortho	Vert IGN	Transparence	
OrthoNB	Vert moyen	Overlay	
Perlin	Vert ortho / Vert moyen	Transparence	
OrthoNB	Vert IGN	Overlay	
Aplat	Vert ortho	Aucune	
Perlin	Vert ortho / Vert IGN	Transparence	

FIGURE C.5 : Paramètres graphiques décrivant les symbolisations des visuels du test.

Questions posées aux participants Les figures C.6 à C.29 présentent les questions posées à l'utilisateur, dans l'ordre du questionnaire interactif.

Question 1 L'hypothèse de travail de la question n°1 est la suivante : la représentation de la forêt proposée, bien que non conventionnelle, permet d'identifier correctement le type d'occupation du sol.

Par cette question, notre objectif est de vérifier que l'utilisation d'une texture procédurale (ici de Perlin, avec les paramètres de couleur et de granularité de la figure C.6) est adaptée à la représentation de la forêt. Pour cela, une représentation cartographique avec une symbolisation de texture de Perlin pour la végétation est présentée aux participants. Un point est identifié sur cette représentation dans la végétation. L'utilisateur doit indiquer la nature du sol en ce point en choisissant une dans une liste donnée. La figure C.6 présente l'énoncé exact de la question, la représentation cartographique et la liste déroulante proposée à l'utilisateur pour qualifier l'occupation du sol qu'il associe à la texture de Perlin.

Question 1

Vous vous trouvez au point A. Quelle est l'occupation du sol ?

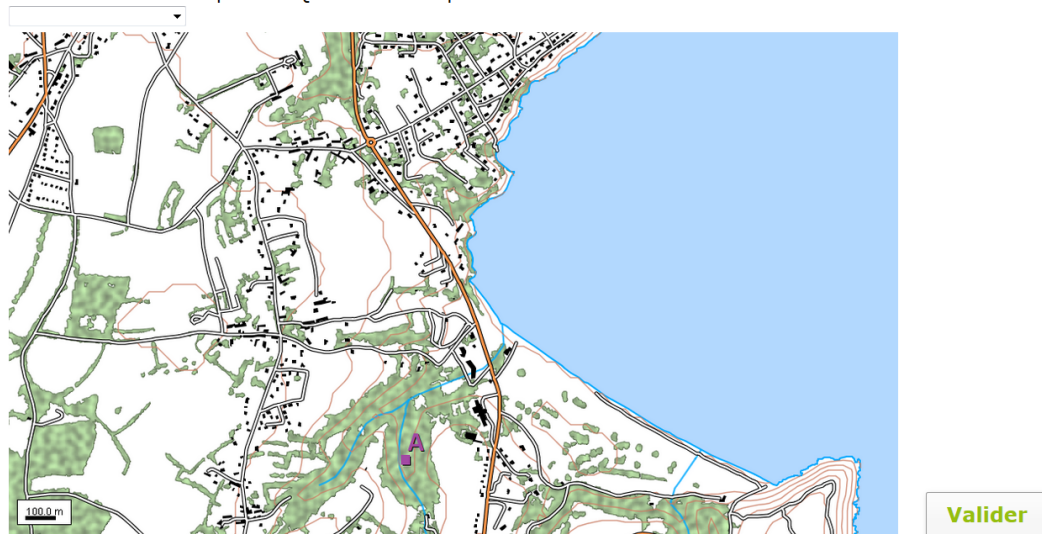


FIGURE C.6 : Question 1

Question 2 L'hypothèse de travail que la question 2 vise à vérifier est l'existence d'un degré de photoréalisme perçu partagé par une majorité de participants. L'objectif de vérification de cette hypothèse est de pouvoir ordonner les symbolisations présentées selon une mesure issue d'une estimation empirique (ici selon le degré de photoréalisme).

En conséquence, la question 2 invite chaque participant à estimer le degré de photoréalisme de différentes symbolisations de la forêt. Pour cela, quatorze symbolisations différentes sont proposées sur la même page, accompagnées d'un curseur permettant à l'utilisateur de qualifier le degré de photoréalisme au regard d'une orthoimage. Les résultats sont enregistrés entre 0 et 100 avec un pas de 5. La figure C.7 présente l'énoncé de la question, l'exemple simplifié associé et les deux premières symbolisations à qualifier par les participants.

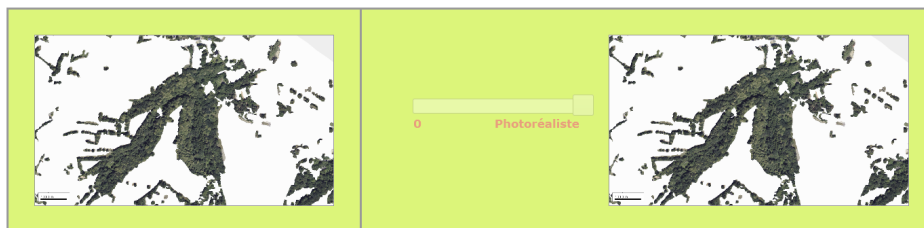
Question 2

Vous visualisez à gauche une image représentant une forêt. Quel est son degré de photoréalisme ?
Faites glisser le curseur et positionnez-le à l'endroit que vous souhaitez.

Vous pouvez **double-cliquer** sur toutes les images pour les voir en plus grand.

Exemple

Ce bloc vous montre un exemple simplifié, dans lequel l'image de gauche est un extrait de photo aérienne. Le curseur est donc positionné à l'extrémité photoréaliste.



A vous de jouer !



FIGURE C.7 : Question 2

Question 3 La question 3 vise à vérifier la même hypothèse de travail que la question 2. En effet, l'objectif de la question 3 est de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus sur les différentes catégories de texture des symbolisations de la question 2. Pour cela, cinq symbolisations représentatives des différentes catégories de texture (neutre, procédurale par poncifs, procédurale par texture de bruit, naturelle par transparence, naturelle par overlay) ont été présentées aux participants pour qu'ils les ordonnent selon leur degré de photoréalisme (Cf. figure C.8).

Question 3a

Vous avez un ensemble d'images représentant une forêt à votre disposition. Ordonnez-les selon leur degré de photoréalisme. Pour cela, faites-les glisser dans les cases vides entre l'extrémité A (une carte) et l'extrémité B (une photo aérienne).

Vous pouvez **double-cliquer** sur toutes les images pour les voir en plus grand.

Images à classer



A vous de jouer !



FIGURE C.8 : Question 3

Question 4 L'objectif de la question 4 est de confirmer les résultats de la question 2. Pour cela, des symbolisations de la question 2 sont présentées deux par deux à l'utilisateur. Celui-ci doit sélectionner l'une des deux, celle qu'il estime être la plus photoréaliste. Cette question a été posée pour onze couples de représentations différents. Ces couples ont été sélectionnés pour comparer l'effet des différents paramètres de symbolisation sur la perception du degré de photoréalisme. De plus, certains couples ont été construit en utilisant une symbolisation de couleur violette, totalement abstraite, en vue de comparer les paramètres de texture indépendamment de la couleur. Les figures C.9 à C.19 présentent les différents couples proposés aux participants.

Question 4a

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

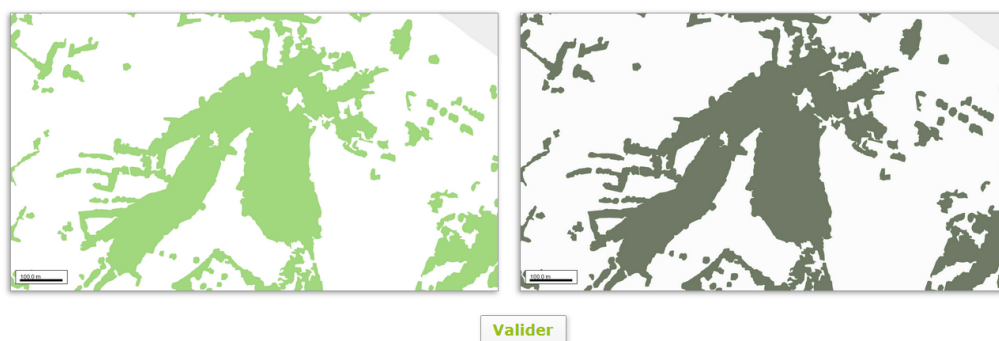


FIGURE C.9 : Question 4a - Comparaison de textures neutres de différentes couleurs.

Question 4b

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

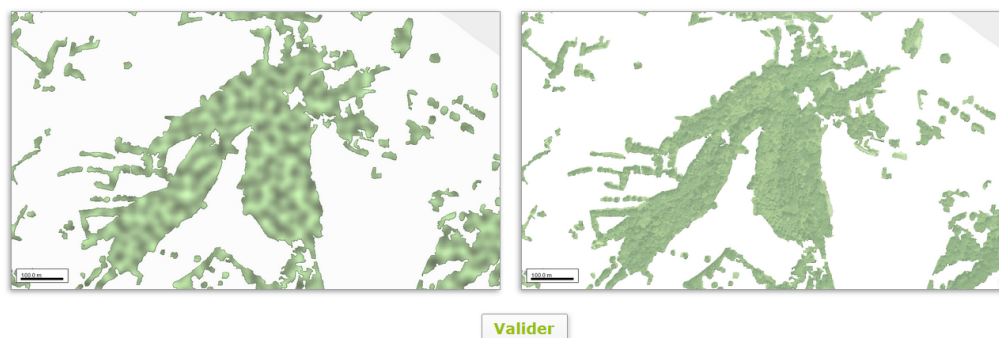


FIGURE C.10 : Question 4b - Comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture naturelle par transparence.

Question 4c

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

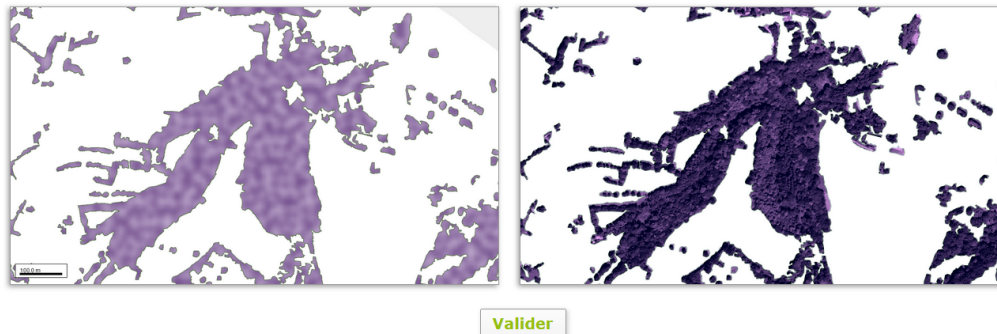


FIGURE C.11 : Question 4c - Comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture naturelle par transparence, indépendamment de la couleur.

Question 4d

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

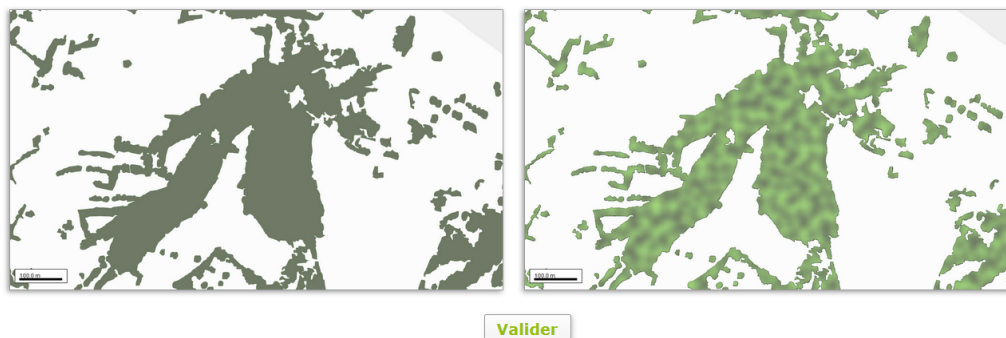


FIGURE C.12 : Question 4d - Comparaison d'une texture neutre et d'une texture procédurale de Perlin.

Question 4e

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

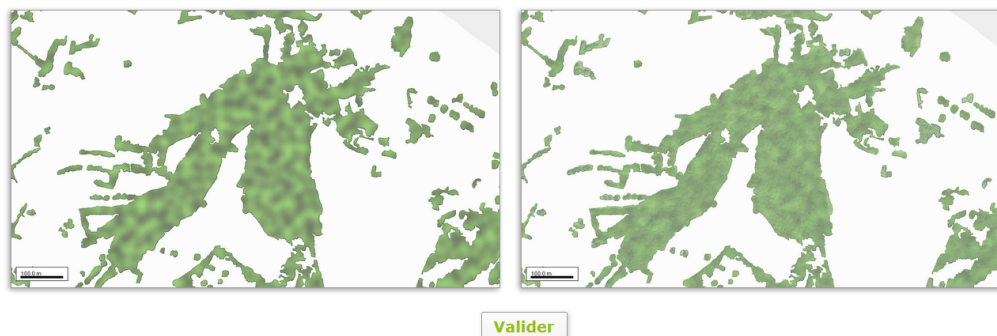


FIGURE C.13 : Question 4e - Comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin).

Question 4f

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

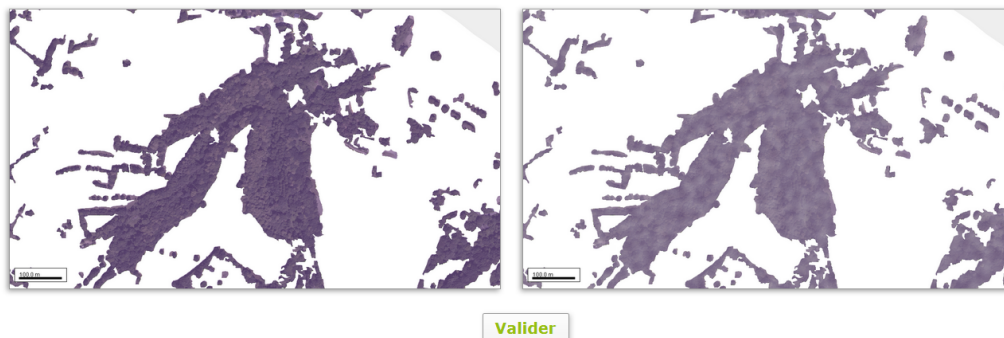


FIGURE C.14 : Question 4f - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin), indépendamment de la couleur.

Question 4g

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

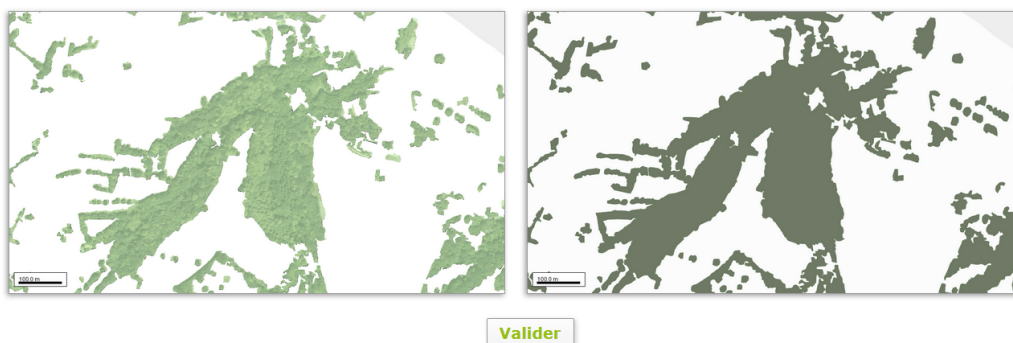


FIGURE C.15 : Question 4g - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture neutre

Question 4h

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

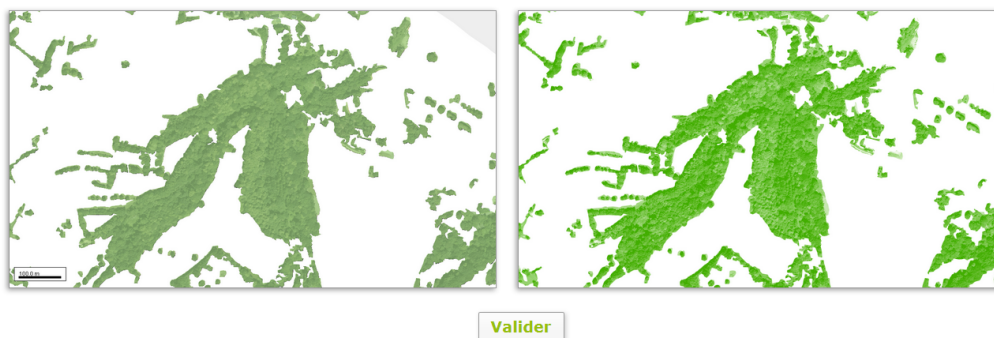


FIGURE C.16 : Question 4h - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture naturelle par overlay.

Question 4i

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

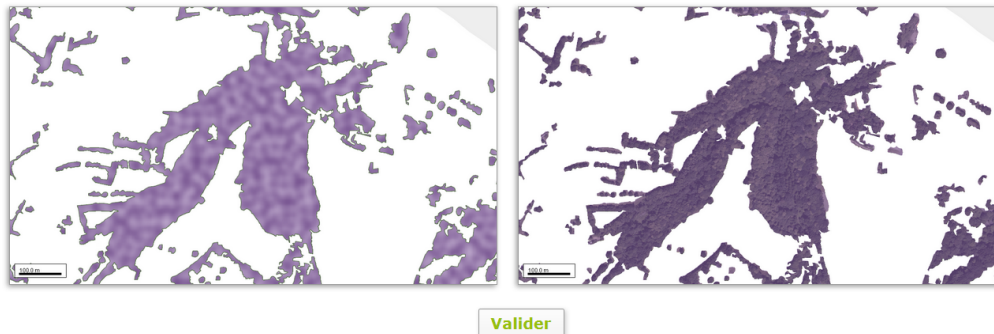


FIGURE C.17 : Question 4i - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture procédurale de Perlin, indépendamment de la couleur.

Question 4j

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

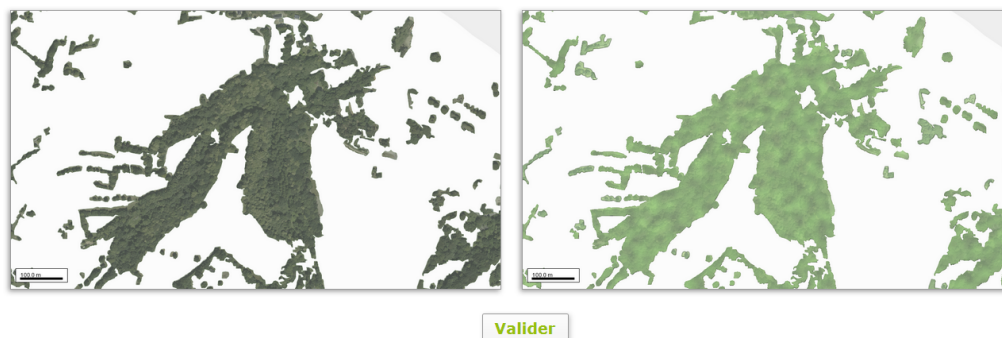


FIGURE C.18 : Question 4j - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin).

Question 4k

Sélectionnez l'image qui vous semble la plus photoréaliste, en cliquant dessus.

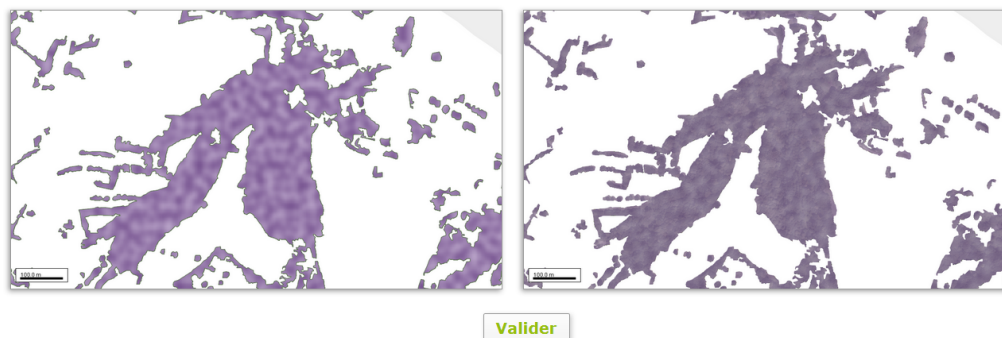


FIGURE C.19 : Question 4k - Comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin), indépendamment de la couleur.

Question 5 La question 5 vise également à vérifier l'hypothèse de travail de la question 2, c'est-à-dire l'existence d'un degré de photoréalisme perçu partagé par une majorité de participants. Pour cela deux questions différentes ont été posées aux participants en vue de leur faire construire des continuums de style selon le degré de photoréalisme évalué afin de déterminer s'il est partagé. Dans les deux cas, l'objectif est de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse de travail, mais également de déterminer dans quel ordre il est opportun d'utiliser les différentes briques d'interpolation présentées dans notre travail de thèse pour passer d'une symbolisation à une autre.

La première question consiste à faire ordonner cinq symbolisations aux participants pour créer un continuum de style (Cf. figure C.20).

Question 5a

Vous avez un nouvel ensemble d'images représentant une forêt à votre disposition. Ordonnez-les selon leur degré de photoréalisme. Pour cela, faites-les glisser dans les cases vides entre l'extrémité A (une carte) et l'extrémité B (une orthophoto).

Vous pouvez **double-cliquer** sur toutes les images pour les voir en plus grand.

Images à classer



A vous de jouer !



Extrémité A

1

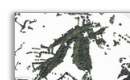
2

3

4

5

Valider



Extrémité B

FIGURE C.20 : Question 5a

La deuxième question consiste à faire choisir aux participants une symbolisation parmi deux symbolisations pour créer un chemin graphique entre deux symbolisations différentes. Cette question a été posée six fois pour faire construire six continuums élémentaires (avec une seule symbolisation pivot) aux participants. Les figures C.21 à C.26 présentent ces six continuums à construire interactivement en faisant glisser la symbolisation sélectionnée au milieu du continuum élémentaire.

Question 5b

Parmi les deux images disponibles, laquelle choisiriez-vous pour passer de A à B ? Faites glisser l'image de votre choix dans la case vide entre A et B.

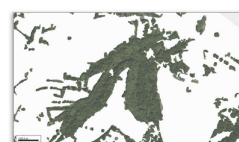
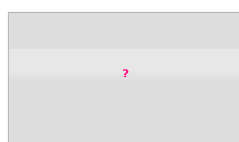
Images disponibles



Trouvez le chemin de A à B !



A



B

FIGURE C.21 : Question 5b - Créer un chemin pour passer d'une texture neutre vert clair à une texture naturelle par transparence vert foncé.

Question 5c

Parmi les deux images disponibles, laquelle choisiriez-vous pour passer de A à B ?
Faites glisser l'image de votre choix dans la case vide entre A et B.

Images disponibles



Trouvez le chemin de A à B !



FIGURE C.22 : Question 5c - Créer un chemin pour passer d'une texture neutre de couleur réaliste à une texture naturelle par transparence de couleur abstraite.

Question 5d

Parmi les deux images disponibles, laquelle choisiriez-vous pour passer de A à B ?
Faites glisser l'image de votre choix dans la case vide entre A et B.

Images disponibles



Trouvez le chemin de A à B !



FIGURE C.23 : Question 5d - Créer un chemin pour passer d'une texture neutre vert clair à une texture procédurale vert moyen et vert foncé.

Question 5e

Parmi les deux images disponibles, laquelle choisiriez-vous pour passer de A à B ?
Faites glisser l'image de votre choix dans la case vide entre A et B.

Images disponibles



Trouvez le chemin de A à B !

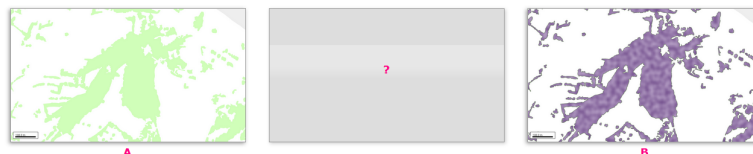


FIGURE C.24 : Question 5e - Créer un chemin pour passer d'une texture neutre de couleur réaliste à une texture procédurale de couleur abstraite.

Question 5f

Parmi les deux images disponibles, laquelle choisiriez-vous pour passer de A à B ?
Faites glisser l'image de votre choix dans la case vide entre A et B.

Images disponibles



Trouvez le chemin de A à B !

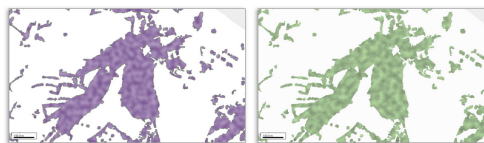


FIGURE C.25 : Question 5f - Créer un chemin pour passer d'une texture procédurale de couleurs claires à une texture mixte de couleurs foncées.

Question 5g

Parmi les deux images disponibles, laquelle choisiriez-vous pour passer de A à B ?
Faites glisser l'image de votre choix dans la case vide entre A et B.

Images disponibles



Trouvez le chemin de A à B !



FIGURE C.26 : Question 5g - Créer un chemin pour passer d'une texture procédurale de couleurs réalistes à une texture mixte de couleurs abstraites.

Question 6 La question 6 vise à vérifier l'hypothèse de travail selon laquelle il est possible d'utiliser une combinaison de brique d'interpolation de symbolisation pour créer un continuum au sein duquel le degré de photoréalisme évolue façon partagée.

Pour vérifier cela, six représentations ont été construites en utilisant des briques d'interpolation de texture procédurale et de transparence pour faire varier la symbolisation de la végétation au sein d'une même représentation cartographique. Ces représentations ont été présentées aux participants qui devaient les ordonner pour former un continuum de style selon leur degré de photoréalisme. La figure C.27 présente les représentations proposées dans le désordre, aux participants.

Question 6

Ordonnez ces représentations selon leur degré de photoréalisme.

Vous pouvez **double-cliquer** sur toutes les images pour les voir en plus grand.



FIGURE C.27 : Question 6

Question 7 La question 7 consiste à faire paramétrer par les participants, la symbolisation de la végétation au sein d'une représentation cartographique complète. Pour cela, l'utilisateur dispose d'un curseur lui permettant de modifier la symbolisation de la végétation sans modifier le reste de la représentation. La figure C.28 présente l'énoncé exact de la question indiquant à l'utilisateur qu'il doit créer une représentation homogène en termes de degré de photoréalisme (c'est-à-dire au sein de laquelle toutes les symbolisations ont un degré de photoréalisme équivalent). Cette question a été posée pour cinq représentations cartographiques différentes : les visuels sont présentés en figure C.28.

Question 7a

Vous visualisez une carte sur laquelle vous pouvez modifier la représentation de la forêt.

Utilisez le curseur afin de choisir la représentation que vous jugez être la plus adaptée à la symbolisation des autres thèmes cartographiques. L'objectif est de créer une carte avec un degré de photoréalisme homogène.

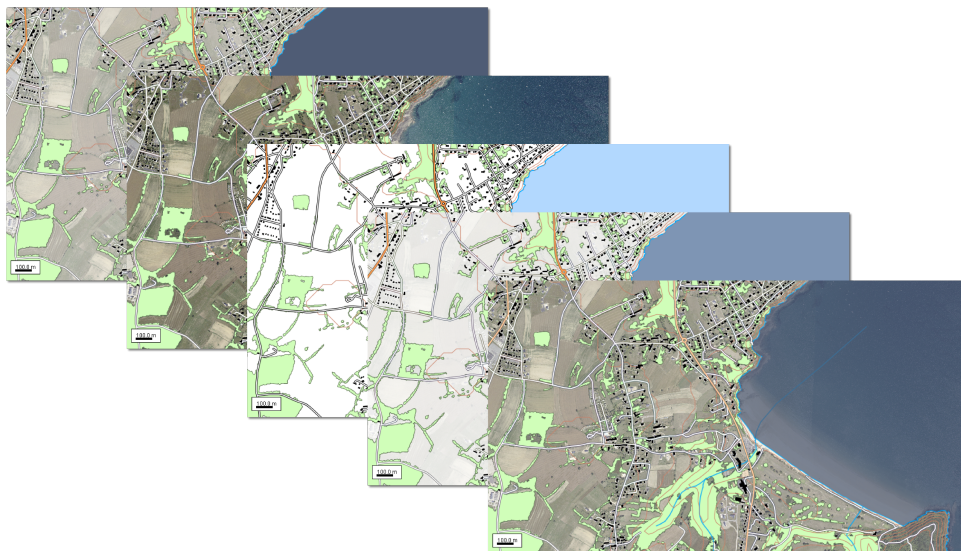


FIGURE C.28 : Question 7 : Énoncé et visuels de support

Question 8 La question 8 vise à déterminer le profil des participants au test. Ceux-ci sont invités à renseigner leur nationalité, leur utilisation de cartes et de photos aériennes, leur profession (Cf. figure C.29).

De quelle nationalité êtes-vous ? *

Utilisez vous des cartes topographiques ? *

- ☐ Oui, pour mes loisirs
- ☐ Oui, pour des besoins professionnels
- ☐ Oui, pour mes loisirs et des besoins professionnels
- ☐ Non

A quelle fréquence utilisez-vous des cartes topographiques? *

- ☐ Plusieurs fois par semaine
- ☐ 2 à 3 fois par mois
- ☐ 2 à 3 fois par an
- ☐ Jamais

Quel type de cartes utilisez-vous? *

- ☐ Cartes papier
- ☐ Cartes numériques
- ☐ Les 2
- ☐ Ni l'un ni l'autre

Concevez-vous des cartes géographiques (topographiques/thématiques/...) ? *

- ☐ Oui, pour mes loisirs
(préparation de randonnées, localisation d'un événement, intégration dans un album photo etc...)
- ☐ Oui, pour des besoins professionnels
(cartographie d'édition, plan de situation, application cartographique métier, cours de cartographie, présentation de travaux de recherche en cartographie, ...)
- ☐ Oui, pour mes loisirs et des besoins professionnels
- ☐ Non

A quelle fréquence concevez-vous des cartes géographiques (topographiques/thématiques/...) ? *

- ☐ Plusieurs fois par semaine
- ☐ 2 à 3 fois par mois
- ☐ 2 à 3 fois par an
- ☐ Jamais

Utilisez vous des photos aériennes ? *

- ☐ Oui, pour mes loisirs
- ☐ Oui, pour des besoins professionnels
- ☐ Oui, pour mes loisirs et des besoins professionnels
- ☐ Non

A quelle fréquence utilisez-vous des photos aériennes ? *

- ☐ Plusieurs fois par semaine
- ☐ 2 à 3 fois par mois
- ☐ 2 à 3 fois par an
- ☐ Jamais

Travaillez-vous dans l'un des domaines suivants ? *

- ☐ Géomatique
- ☐ Cartographie
- ☐ Géographie
- ☐ Systèmes d'information géographique
- ☐ Photogrammétrie et/ou traitement d'image
- ☐ Urbanisme
- ☐ Architecture
- ☐ Agriculture
- ☐ Autre

FIGURE C.29 : Question 8 : Profil utilisateur

C.2 Analyse du profil des participants

Le panel des participants au test est constitué de 462 personnes différentes, dont 311 ont répondu à l'intégralité du test. Nous avons exploité uniquement ces 311 réponses complètes pour dessiner le profil des participants, ainsi que pour la compilation et l'analyse des résultats présentée au paragraphe suivant.

Les questions du test étaient rédigées en français et il a été diffusé sur des canaux de communication francophones. En conséquence, le panel des participants est en grande majorité français (95% des participants). De plus, les appels à participation ont été lancés sur des réseaux professionnels mais également à des contacts personnels afin d'élargir les domaines de compétences des personnes testées. Ainsi, une grande partie de notre panel travaille dans les domaines de la géomatique, la cartographie, la géographie ou les SIG mais nous avons également touché un public issu des domaines de la photogrammétrie, de l'urbanisme, de l'architecture, de l'agriculture. La

figure C.30 illustre la répartition des domaines de compétence professionnelle de notre panel de participants. *NotaBene* : Les participants pouvaient choisir plusieurs domaines de compétences.

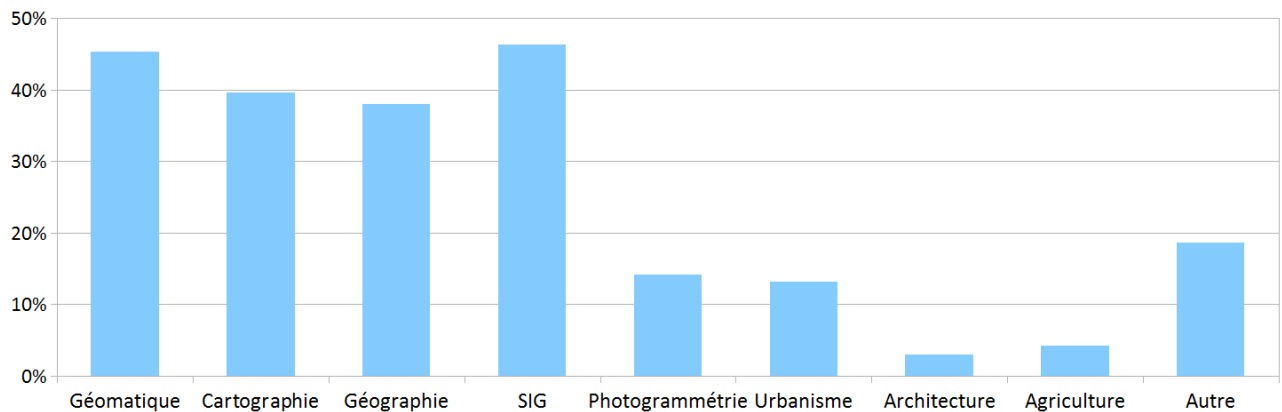


FIGURE C.30 : Domaine(s) professionnel(s) des participants au test utilisateur.

Afin de mieux comprendre le rapport à la carte et à la photo aérienne de notre panel utilisateur, nous leur avons demandé de qualifier leur utilisation de cartes topographiques et de photos aériennes. La figure C.31 indique que les participants utilisent des cartes topographiques avec une fréquence d'utilisation variée. Notre panel est représentatif d'un public plutôt coutumier des cartes topographiques et familier de leurs conventions. De plus, la moitié des participants utilise des cartes topographiques à la fois pour un usage de loisir et pour un usage professionnel, un quart des participants uniquement pour un usage de loisir et un huitième uniquement pour un usage professionnel. Il est donc légitime de considérer que notre panel couvre un éventail varié d'usages de la carte topographique. Enfin, la majorité des participants utilise des cartes topographiques sur différents support et seulement 14% n'utilisent que des cartes au format papier. Les participants ont donc dans l'ensemble déjà été confrontés à l'utilisation d'outils interactifs permettant de naviguer dans une représentation cartographique et potentiellement de la personnaliser.

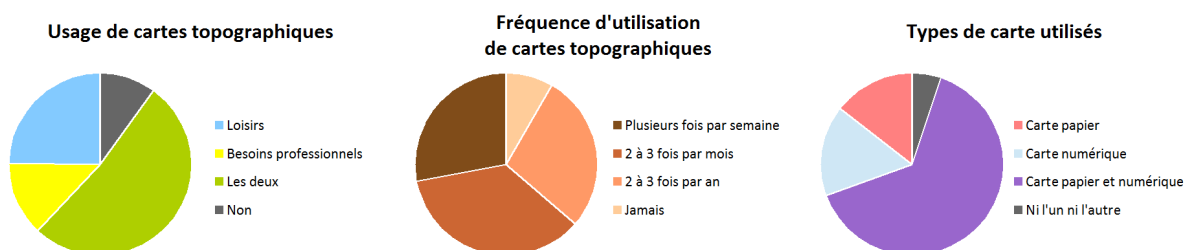


FIGURE C.31 : Usages des cartes topographiques

Pour en savoir plus sur leur expérience en conception cartographique, nous leur avons demandé de qualifier le contexte dans lequel ils ont conçu une ou plusieurs représentations cartographiques. La figure C.32 nous renseigne sur les pratiques cartographiques de notre panel d'utilisateurs : 79% des participants conçoivent des cartes, là aussi pour des besoins variés (loisirs, professionnels ou les deux). Une majorité de notre panel a donc déjà eu l'occasion de choisir une symbolisation cartographique pour l'associer à un thème cartographique et intégrer celui-ci à une représentation cartographique complète.

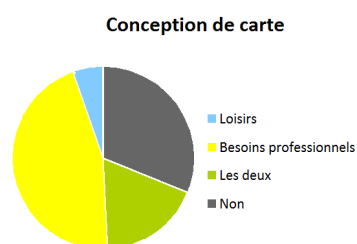


FIGURE C.32 : Conception et type de cartes

La figure C.33 indique que la grande majorité des participants les utilisent régulièrement des photos aériennes. Tout comme pour les cartes topographiques, les usages et fréquences d'utilisation de photos aériennes sont variés.

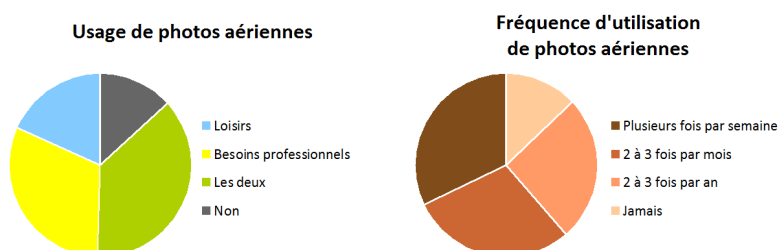


FIGURE C.33 : Usage de photos aériennes

C.3 Analyse des réponses

Dans cette section, nous dressons un panorama des réponses des participants. Pour chaque question, nous indiquons le nombre de participants ayant choisi les différentes réponses possibles, ainsi que certaines valeurs statistiques utiles à la description de la distribution de ces réponses.

C.3.1 Temps de réponses

L'heure précise à laquelle les participants ont validé chacune des questions en passant à une page suivante du questionnaire a été enregistrée. Cette information permet de mesurer des temps de réponse pour chacune des questions. Cependant, ce n'est pas l'heure des interactions des participants (sélection, manipulation, déplacement, etc. des représentations) qui a été enregistré. En conséquence, si un participant n'a pas rempli le questionnaire en une seule fois (par exemple s'il a réalisé une autre activité sur son ordinateur ou ailleurs entre deux questions tout en laissant le questionnaire ouvert), les temps de réponse peuvent être fortement sur-estimés. Pour pallier à cela, les temps de réponse à une question supérieurs à dix minutes ont été considérés comme aberrants et n'ont pas été pris en compte dans les résultats présentés dans cette section ni dans leur analyse. De même, les temps de réponse au questionnaire complet supérieurs à une heure n'ont pas été considérés dans la suite des résultats.

Le tableau de la figure C.34 présente des mesures statistiques concernant les temps de réponse au questionnaire complet. Ces mesures sont exprimées en minutes.

Temps total moyen	Ecart-type des temps totaux	Temps total minimum
15 min	10 min	4 min

FIGURE C.34 : Moyenne, écart-type et minimum des temps de réponse au questionnaire complet.

Les tableaux de la figure C.35 indiquent pour chaque question le temps de réponse moyen des participants ainsi que l'écart-type de ces temps de réponses. L'ensemble de ces résultats est exprimé en minutes.

Questions	q1	q2	q3	q4a	q4b	q4c	q4d	q4e	q4f	q4g	q4h	q4i	q4j	q4k
Temps moyen	0,68	2,43	0,84	0,29	0,10	0,11	0,12	0,09	0,10	0,37	0,10	0,07	0,07	0,10
Ecart-types	0,29	1,20	0,51	0,35	0,17	0,08	0,20	0,07	0,08	0,14	0,18	0,18	0,05	0,29

Questions	q5a	q5b	q5c	q5d	q5e	q5f	q5g	q6	q7a	q7b	q7c	q7d	q7e	q8
Temps moyen	1,51	0,31	0,31	0,17	0,17	0,18	0,18	2,55	1,34	1,00	0,54	0,57	5,18	2,70
Ecart-types	0,50	0,51	0,24	0,15	0,27	0,14	0,31	0,72	0,92	0,94	0,60	0,62	1,07	1,42

FIGURE C.35 : Moyennes et écarts-types des temps de réponse aux questions posées

La figure C.36 présente une synthèse graphique de ces résultats pour chaque question.

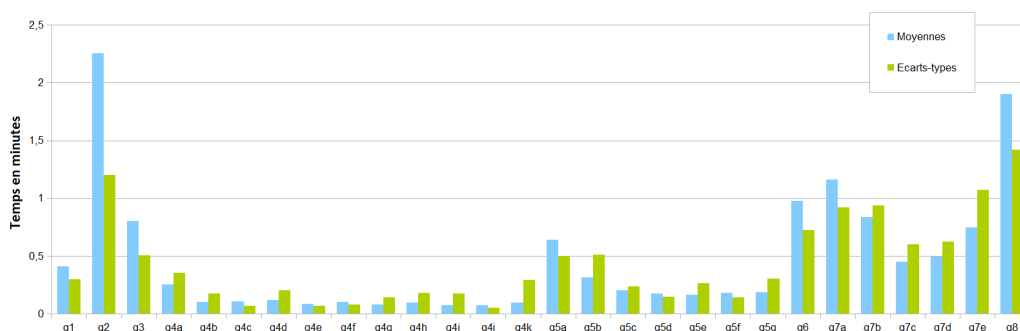


FIGURE C.36 : Temps de réponse moyens aux différentes questions du test

Globalement, les temps de réponse aux questions (pour la plupart inférieurs à une minute) et le temps moyen de réponse à l'ensemble du questionnaire (de quinze minutes) attestent d'une réalisation plutôt rapide du test utilisateur. La question n° 2 présente la particularité de regrouper quatorze représentations à qualifier, tandis que les autres questions présentaient uniquement une tâche à réaliser. Cela explique le temps important de réponse à cette question (supérieur à deux minutes). De même, la question n° 8 regroupe plusieurs questions concernant le profil de l'utilisateur, ce qui explique que les participants y aient passé plus de temps.

Par ailleurs, il est notable que le temps de réponse est important à chaque changement de type de question (n° 4a, n° 5b, n° 6, n° 7a) puis qu'il diminue pour une série de questions similaires (notamment pour toutes les questions n° 4 et n° 5). Cela indique que les participants ont besoin d'un temps d'adaptation lorsqu'ils rencontrent un nouveau type de question interactive et que les tâches interactives demandées sont suffisamment intuitives pour que les participants se les approprient facilement.

Enfin, on peut remarquer que les questions consistant à ordonner des représentations (questions n° 3, n° 5a et n° 6) et les questions consistant à paramétrer une symbolisation nécessitent

plus de temps (autour d'une minute) que les questions consistant à choisir une image parmi deux (temps de sélection inférieur à trente secondes).

C.3.2 Question 1 - Utilisation d'une texture de Perlin pour représenter la forêt

La figure C.37 indique le nombre et la part de participants ayant choisi les différentes occupations du sol proposées.

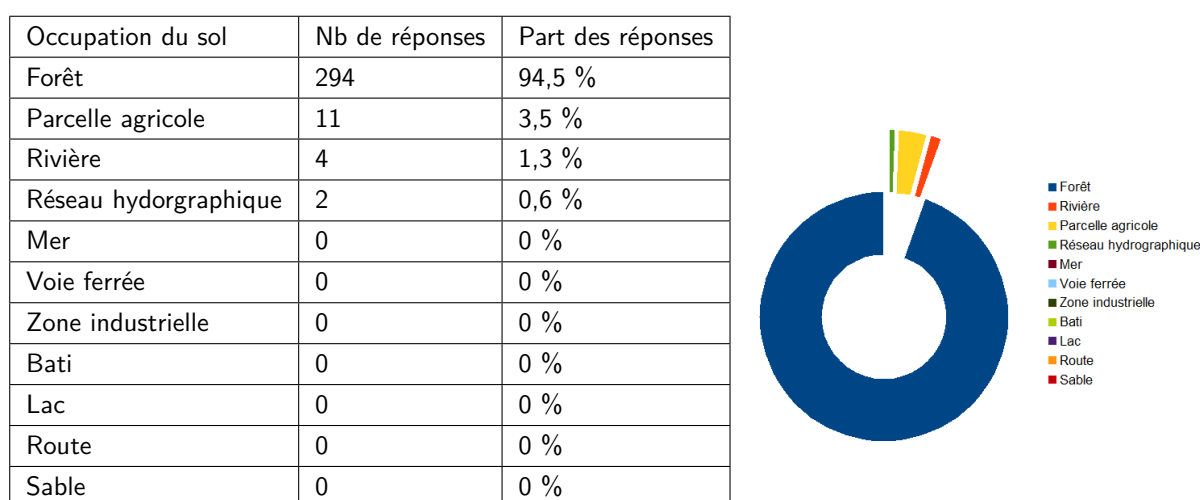

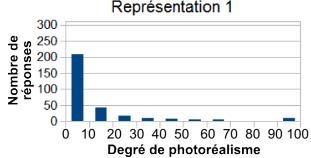

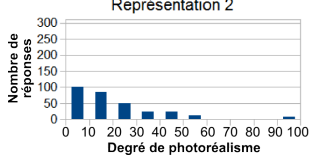
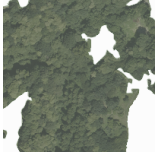
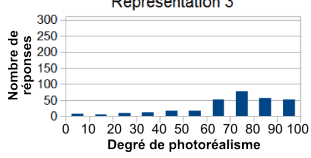

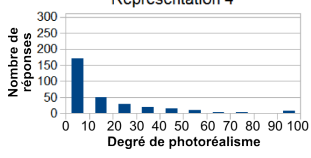
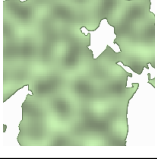
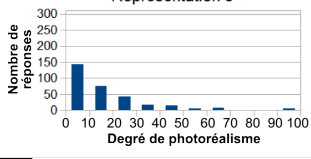

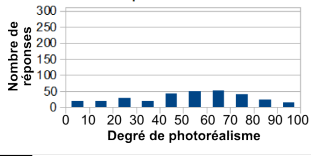
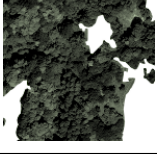
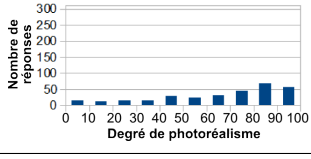

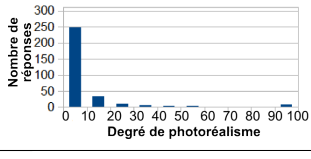

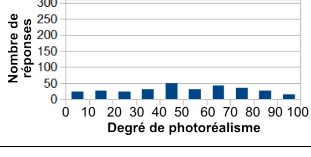


FIGURE C.37 : Nombre de réponses selon le type d'occupation du sol sélectionné

L'hypothèse de travail selon laquelle une texture de Perlin est adaptée à la représentation de végétation est confirmée. En effet, la très grande majorité des participants a répondu que l'occupation du sol au point identifié sur la carte est de la forêt. Les réponses faisant référence à une rivière ou à un réseau hydrographique peuvent être expliquées par la présence d'un élément hydrographique linéaire à proximité du point identifié sur la carte support.

C.3.3 Question 2 - Qualifier le degré de photoréalisme

Le tableau de la figure C.38 présente les valeurs moyennes et les écarts-types des estimations du degré de photoréalisme des symbolisations par les participants. De plus, pour chaque symbolisation, un histogramme représente la répartition des réponses tous les 10 (entre 0 et 10, entre 10 et 20, ...) pour illustrer les distributions plus finement que l'écart-type. Les représentations sont présentées dans le même ordre qu'aux participants.

Symbolisation	Moyenne	Ecart-type	Histogramme
	13,68	23,29	<p>Représentation 1</p> 
	22,70	20,80	<p>Représentation 2</p> 
	72,64	22,42	<p>Représentation 3</p> 
	17,68	22,91	<p>Représentation 4</p> 
	18,52	19,99	<p>Représentation 5</p> 
	55,13	24,87	<p>Représentation 6</p> 
	68,28	27,22	<p>Représentation 7</p> 
	8,62	18,38	<p>Représentation 8</p> 
	51,98	26,32	<p>Représentation 9</p> 

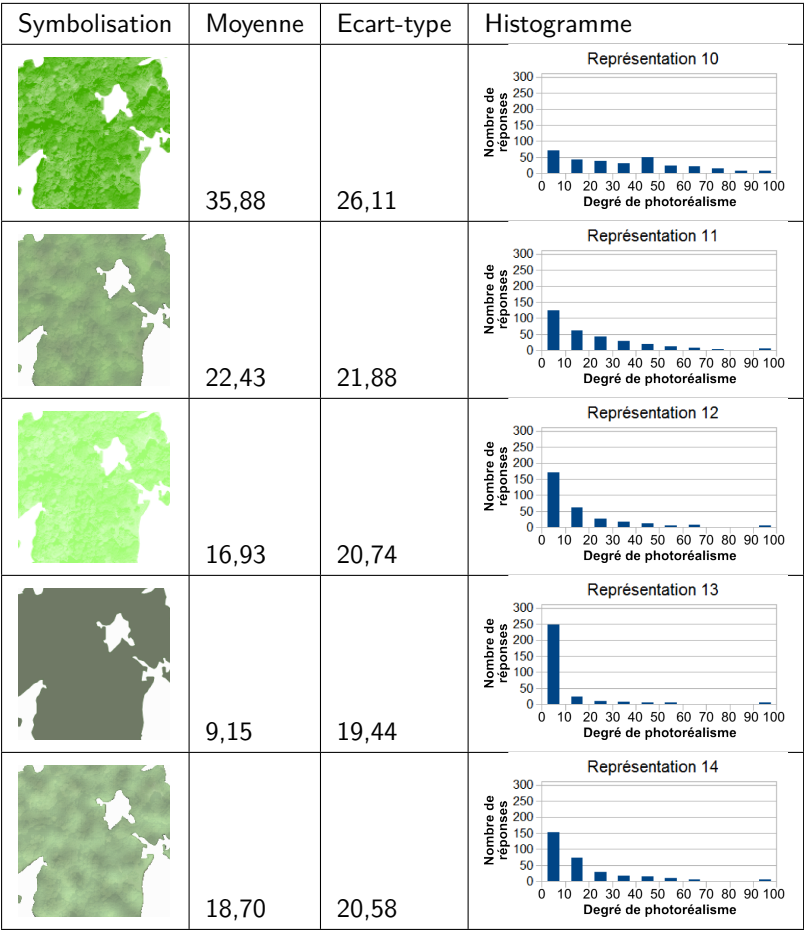


FIGURE C.38 : Tableau synthétique des estimations de degré de photoréalisme perçu.

La figure C.39 synthétise graphiquement les valeurs moyenne et maximale des estimations pour les différentes symbolisations (qui sont numérotées dans leur ordre d'apparition). Les valeurs minimales ne sont pas indiquées car elle sont toutes égales à zéro : cela est dû au fait que la valeur par défaut était à zéro donc si l'utilisateur n'a pas touché au curseur, la valeur est restée à zéro.

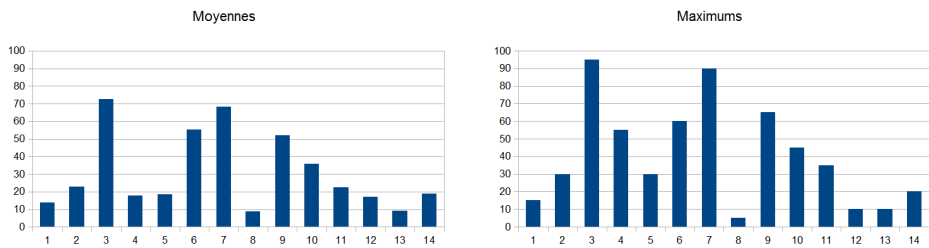


FIGURE C.39 : Répartition des valeurs moyennes et maximums

La figure C.40 présente une répartition assez homogène des écart-types des estimations des participants. Le degré de réalisme semble également facile/difficile/consensuel à définir pour les 14 représentations de la forêt présentées.

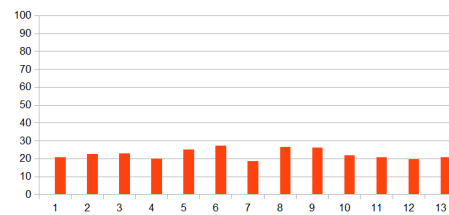


FIGURE C.40 : Répartition des écart-types

Cependant, les histogrammes des distributions (Cf. tableau figure C.38) présentent des répartitions différentes ; certaines faisant apparaître un consensus certain sur le degré de photoréalisme, d'autres une répartition homogène des avis des utilisateurs quant au degré de photoréalisme. Par exemple, les textures neutres (en aplat) sont jugées très majoritairement comme étant très peu photoréalistes. A contrario, les estimations du degré de photoréalisme des textures naturelles par transparence ne sont pas unanimement jugées comme étant peu ou très photoréalistes. La distribution des réponses pour ces symbolisations est très étalée, ce qui laisse à penser que le degré de photoréalisme est plus difficile à estimer dans ce cas-là. Enfin, les textures procédurales ou mixtes sont plutôt jugées comme étant peu réalistes même si elles présentent un étalement plus important de réponses que pour les textures neutres.

Analyse des valeurs moyennes et des facteurs influant sur le degré de photoréalisme La figure C.41 représente les symbolisations ainsi qualifiées par les participants selon un axe de degré de photoréalisme horizontal. Leur positionnement vertical n'a pas de sens, il est uniquement utile à la visualisation car il évite les chevauchements entre symbolisations de degrés de photoréalisme similaires.

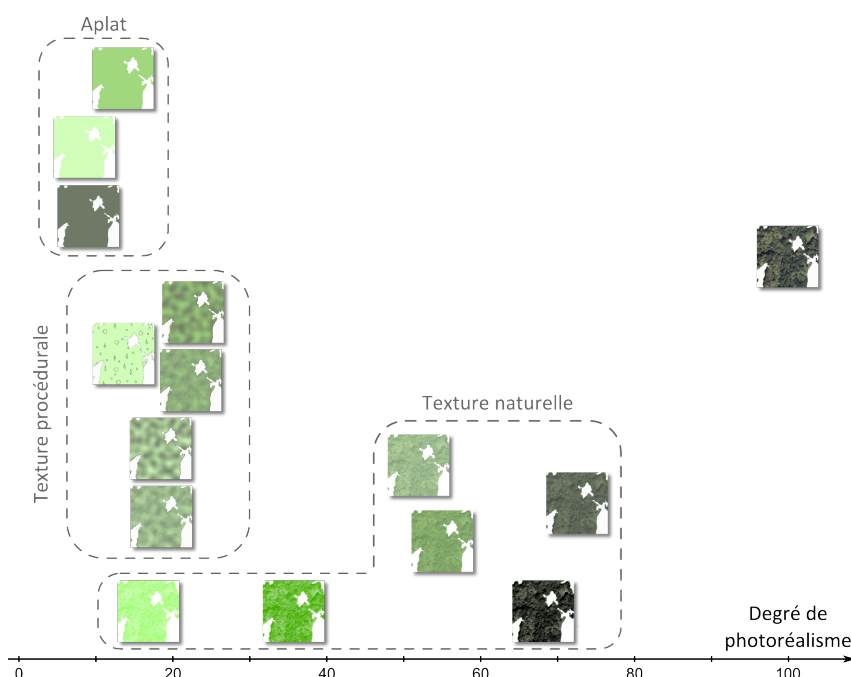


FIGURE C.41 : Symbolisations positionnées selon leur degré de photoréalisme estimé moyen.

Le positionnement de la représentation de la forêt avec le vert majoritaire de l'orthophoto en aplat de couleur indique que la couleur ne suffit pas à elle seule à augmenter le degré de photoréalisme.

La texture apparaît comme un facteur déterminant pour le degré de photoréalisme. En effet, les représentations en aplat sont toutes positionnées à l'extrémité abstraite du continuum, puis viennent les représentations réalisées en utilisant une texture de synthèse (la texture de Perlin), enfin toutes les représentations laissant apparaître d'une manière ou d'une autre la texture naturelle de l'orthophoto (par transparence ou en overlay) sont celles qui ont été qualifiées avec un fort degré de photoréalisme.

Enfin, au sein d'une catégorie de texture, les représentations sont ordonnées selon leur couleur. La couleur apparaît donc comme une variable visuelle complémentaire et secondaire à la texture.

Analyse relative Les symbolisations à qualifier étaient toutes présentées sur une page afin de permettre à l'utilisateur de comparer ses estimations et de les rendre cohérentes les uns par rapport aux autres. En conséquence, les estimations de degré de photoréalisme ont été analysées deux à deux pour chaque couple de symbolisations. La figure C.42 présente à gauche les pourcentages de participants ayant estimé que la symbolisation en ligne était plus photoréaliste que la symbolisation en colonne pour un couple donné. Lorsque plus de la moitié des participants a estimé que la représentation en ligne est plus photoréaliste que celle en colonne, la case correspondante au couple a été colorée en vert. Dans le cas contraire, elle a été colorée en jaune. La matrice de droite de la figure C.42 a été par transformation de la matrice de gauche grâce à la méthode des matrices de Bertin [Bertin \[1977\]](#) (Cf. chapitre 4.3).

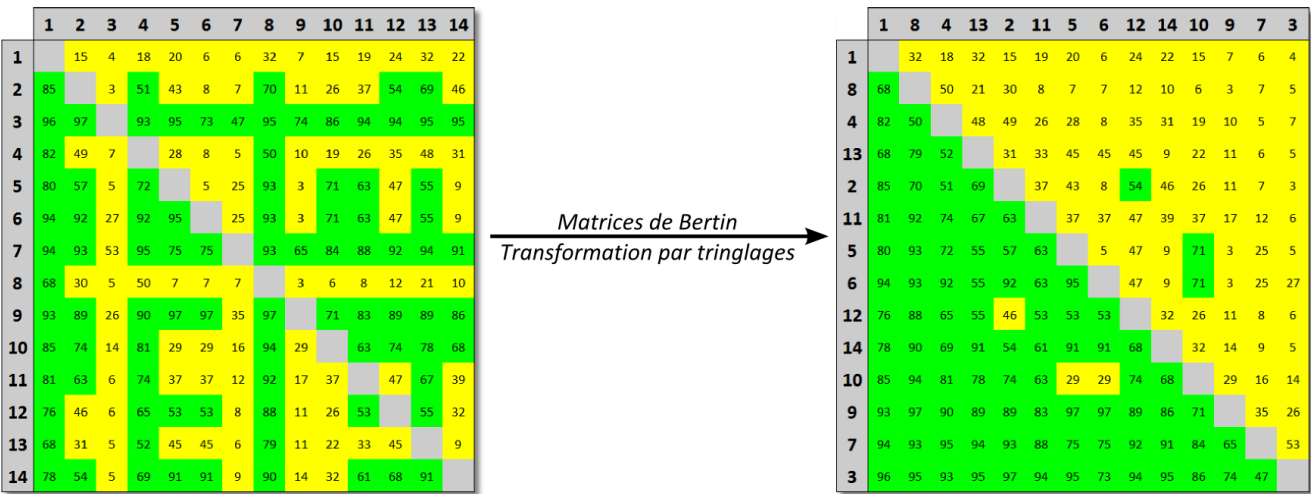


FIGURE C.42 : Résultats relatifs entre les symbolisations deux à deux

Cette analyse par matrice de Bertin a permis d'établir un ordre quasi total entre les symbolisations selon leur degré de photoréalisme (Cf. figure C.43). Cela tend à confirmer l'hypothèse de travail selon laquelle il existe un degré de photoréalisme perçu partagé par une majorité de participants.

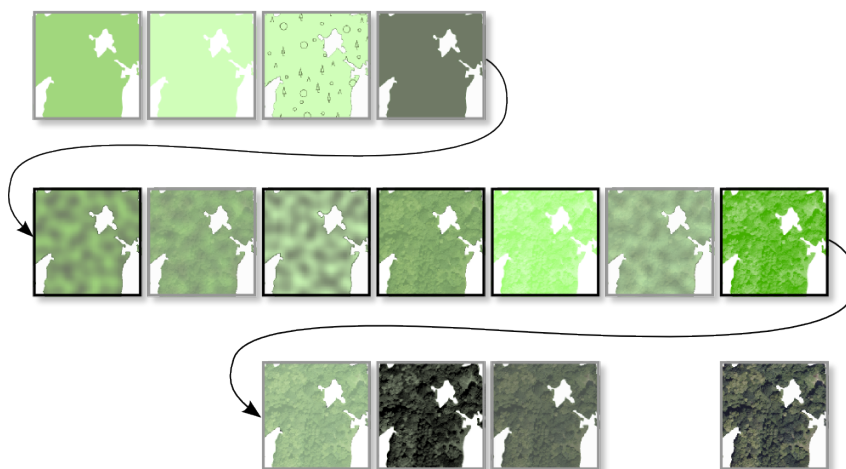


FIGURE C.43 : Ordonnancement des symbolisations selon leurs degrés de photoréalisme relatifs

C.3.4 Question 3 - Classer selon le degré de photoréalisme

Le tableau C.44 à double entrée présente le nombre de fois qu'une représentation a été choisie pour une position donnée et inversement. La figure C.45 synthétise ces résultats graphiquement.


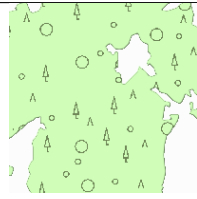

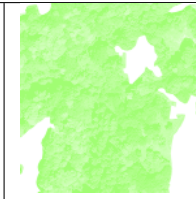
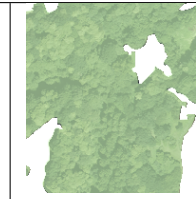
					
Position 1	25	64	145	76	1
Position 2	50	116	67	75	3
Position 3	117	76	53	60	5
Position 4	109	51	30	99	22
Position 5	10	4	16	1	280

FIGURE C.44 : Nombre d'apparition des cartes dans les différentes positions de la série

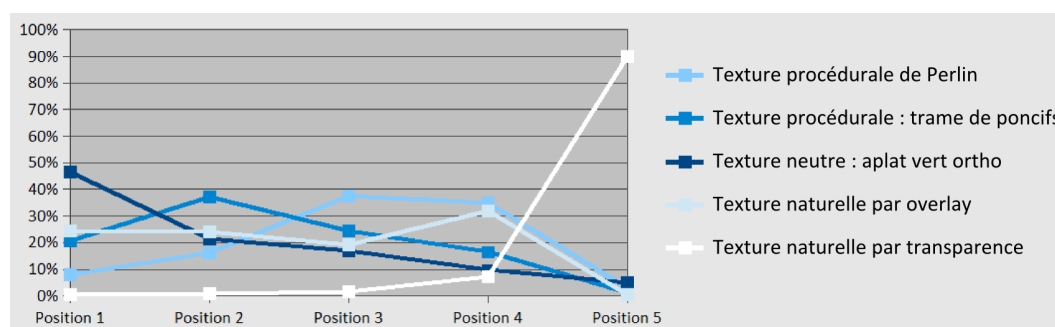


FIGURE C.45 : Ordonnancement des symbolisations par les participants

Il y a pratiquement correspondance entre la place qui a été choisie majoritairement pour une représentation donnée et la représentation qui a majoritairement été choisie pour une place

donnée. C'est à dire que les maximums des colonnes correspondent quasiment aux maximums des lignes dans le tableau C.44. Cela confirme à nouveau l'hypothèse d'existence d'un degré de photoréalisme perçu partagé et nous permet de reconstruire un premier continuum majoritaire présenté à la figure C.46.



FIGURE C.46 : Reconstitution d'un continuum majoritaire

Analyse des séries construites L'ensemble des participants a construit 44 séries différentes. La figure C.47 présente les séries construites par au moins 5% des participants aux test.

Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Total	Part
					52	17%
					27	9%
					22	7%
					21	7%
					18	6%
					17	5%
					15	5%
					15	5%

FIGURE C.47 : Nombre d'apparition des cartes dans les différentes positions de la série

Les séries construites par les participants présentent une assez grande hétérogénéité. Cependant, on peut noter que le continuum majoritaire de la figure C.46 correspond à la série qui a été la plus construite (17% des participants). De plus, la symbolisation présentant une texture naturelle par transparence est toujours sélectionnée comme étant la plus photoréaliste. Cela nous permet d'identifier la texture naturelle comme un facteur déterminant pour l'augmentation du niveau de photoréalisme.

C.3.5 Question 4 - Degré de photoréalisme relatif dans un couple

Le tableau de la figure C.48 présente les pourcentages de participants ayant choisi l'une et l'autre des symbolisations proposées comme étant la plus photoréaliste des deux. Ces résultats sont ensuite détaillés pour chaque couple dans l'ordre où ils ont été présentés aux participants du test.

a	Vert Moyen	54%	46%	Vert Ortho
b	Perlin Vert IGN / Vert Ortho	0%	100%	Vert IGN Transparent
c	Perlin Violet	3%	97%	Overlay Violet Ortho NB
d	Vert Ortho	29%	71%	Perlin Vert Moyen/ Vert Ortho
e	Perlin Vert Moyen / Vert Ortho	2%	98%	Perlin Transparent Vert moyen/Vert Ortho
f	Vert Transparent	99%	1%	Perlin Violet Transparent
g	Vert IGN Transparent	99%	1%	Vert Ortho
h	Vert Moyen Transparent	95%	5%	Overlay Vert moyen / Ortho NB
i	Perlin Violet	0%	100%	Violet Transparent
j	Vert Ortho Transparent	97%	3%	Perlin Transparent Vert moyen/Vert Ortho
k	Perlin Violet	1%	99%	Perlin Violet Transparent

FIGURE C.48 : Résultats de la question 4

C.3.5.1 4a - Réalisme de la couleur

Le résultat de comparaison du degré de photoréalisme de deux aplats colorés (de texture neutre) est très mitigé entre un vert moyen (barycentre coloré entre vert issu d'une carte topographique de l'IGN et vert issu de l'orthophotographie) et un vert issu de l'orthophotographie (Cf. figure C.49). Il ne permet pas de déterminer laquelle de ces deux couleurs donne plus de photoréalisme à la symbolisation. Cette ambiguïté dans le résultat est peut-être due au manque de précision sur le type de forêt ou de végétation représentée.

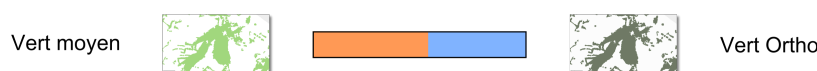


FIGURE C.49 : Résultats de la question 4a

C.3.5.2 4b - Texture procédurale de Perlin VS Texture naturelle par transparence

Le résultat de comparaison du degré de photoréalisme d'une symbolisation présentant une texture procédurale de Perlin et d'une symbolisation présentant une texture naturelle par transparence est

unanime (Cf. figure C.50). Tous les participants ont sélectionné la symbolisation par transparence comme étant plus photoréaliste qu'une symbolisation par texture de Perlin.

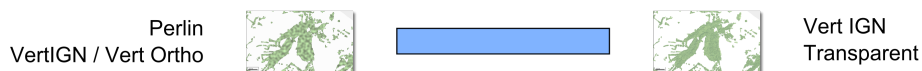


FIGURE C.50 : Résultats de la question 4b

C.3.5.3 4c - Texture procédurale de Perlin VS Texture naturelle par Overlay, indépendamment de la couleur

Le résultat de comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture naturelle par overlay est très homogène (Cf. figure C.51). Le mode de composition par overlay produit un résultat plus photoréaliste qu'une texture procédurale de Perlin. Indépendamment de la couleur, cela confirme le résultat de la question principale en ce qui concerne le degré de photoréalisme des catégories de texture naturelle et procédurale.



FIGURE C.51 : Résultats de la question 4c

C.3.5.4 4d - Aplat de couleur VS Texture procédurale de Perlin

Le résultat de la comparaison d'une texture neutre (en aplat) de couleur naturelle extraite de l'orthophotographie et d'une texture procédurale de Perlin est plutôt homogène (Cf. figure C.52). La texture de Perlin produit un résultat plus photoréaliste qu'un aplat de couleur extraite de l'ortho. Ce résultat était plutôt prévisible puisque la texture de Perlin proposée est construite à partir de cette même couleur extraite, et ajoute un effet de texture. Cela confirme néanmoins que l'ajout de cet effet de texture augmente le degré de photoréalisme.



FIGURE C.52 : Résultats de la question 4d

C.3.5.5 4e - Apport de la transparence sur une texture de Perlin

Le résultat de comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture mixte (procédurale de Perlin et naturelle par transparence) est très homogène (Cf. figure C.53). La transparence augmente le degré de photoréalisme d'une texture de Perlin par l'apport d'un effet de texture naturelle.



FIGURE C.53 : Résultats de la question 4e

C.3.5.6 4f - Apport de la texture de Perlin sur la transparence, indépendamment de la couleur

Le résultat de comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture mixte (procédurale de Perlin et naturelle par transparence) indépendamment de la couleur est très homogène (Cf. figure C.54). La texture de Perlin n'augmente pas le photoréalisme d'une représentation déjà transparente. Le résultat de la question 4j est confirmé par cet exemple poussé à l'extrême par l'utilisation de couleurs abstraites.



FIGURE C.54 : Résultats de la question 4f

C.3.5.7 4g - Texture naturelle par transparence VS Aplat de couleur

Le résultat de la comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture mixte de couleur naturelle (extraite de l'orthophotographie) est très homogène (Cf. figure C.55). En intégrant une texture naturelle, la symbolisation par transparence apporte plus de photoréalisme que la couleur seule utilisée en aplat.



FIGURE C.55 : Résultats de la question 4g

C.3.5.8 4h - Texture naturelle par transparence VS Texture naturelle par Overlay

Le résultat de la comparaison de deux symbolisations faisant apparaître une texture naturelle (la transparence et le mode de composition Overlay) est très homogène (Cf. figure C.56). La symbolisation par transparence apporte plus de photoréalisme que le mode de composition Overlay. Cependant, ce résultat est peut-être faussé par la couleur très vive résultant de l'application du mode de composition.



FIGURE C.56 : Résultats de la question 4h

C.3.5.9 4i - Texture naturelle par transparence VS Texture procédurale de Perlin, indépendamment de la couleur

Le résultat de comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture procédurale de Perlin indépendamment de la couleur est unanime (Cf. figure C.57). Tous les participants ont sélectionné la symbolisation par transparence comme étant plus photoréaliste que la symbolisation par texture de Perlin. Le résultat de la question 4b est confirmé par cette question proposant des symbolisations de couleurs abstraites.



FIGURE C.57 : Résultats de la question 4i

C.3.5.10 4j - Apport de la texture de Perlin sur la transparence

Le résultat de la comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin) est très homogène (Cf. figure C.58). La texture de Perlin n'apporte pas de photoréalisme à une représentation déjà transparente. C'est le côté naturel de la texture qui est déterminant pour augmenter et contrôler le degré de photoréalisme.



FIGURE C.58 : Résultats de la question 4j

C.3.5.11 4k - Apport de la transparence sur la texture de Perlin, indépendamment de la couleur

Le résultat de la comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin), indépendamment de la couleur, est très homogène (Cf. figure C.59). La transparence augmente le photoréalisme d'une texture procédurale de Perlin. Le résultat de la question 4e est confirmé par cette question qui présente des symbolisations de couleurs abstraites.



FIGURE C.59 : Résultats de la question 4k

C.3.5.12 Conclusion

La figure C.60 représente les liens de photoréalisme déduits des différents cas et permettant d'ordonner les différentes catégories de texture de la moins photoréaliste à la plus photoréaliste.

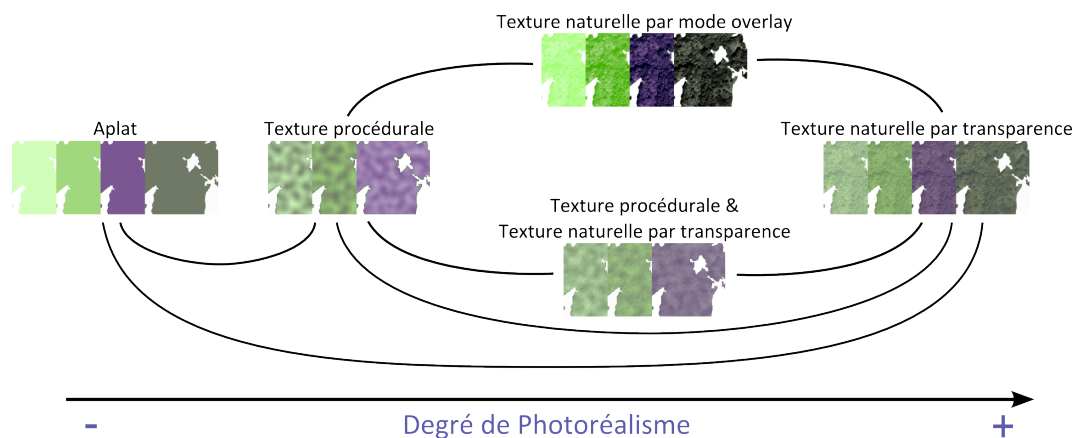


FIGURE C.60 : Synthèse des résultats de la question 4

C.3.6 Question 5 - Enchaîner les briques d'interpolation de symbolisations pour créer un continuum

C.3.6.1 5a : Existence d'un ordre consensuel ?

Le tableau C.61 à double entrée présente le nombre de fois qu'une représentation a été choisie pour une position donnée et inversement. La figure C.62 synthétise ces résultats graphiquement.


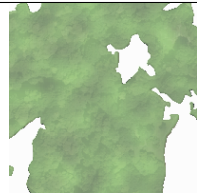
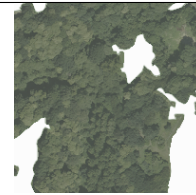
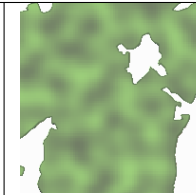

					
Position 1	4	10	3	37	257
Position 2	15	77	5	198	16
Position 3	19	191	7	61	33
Position 4	237	30	27	14	3
Position 5	36	3	269	1	2

FIGURE C.61 : Nombre d'apparition des cartes dans les différentes positions de la série

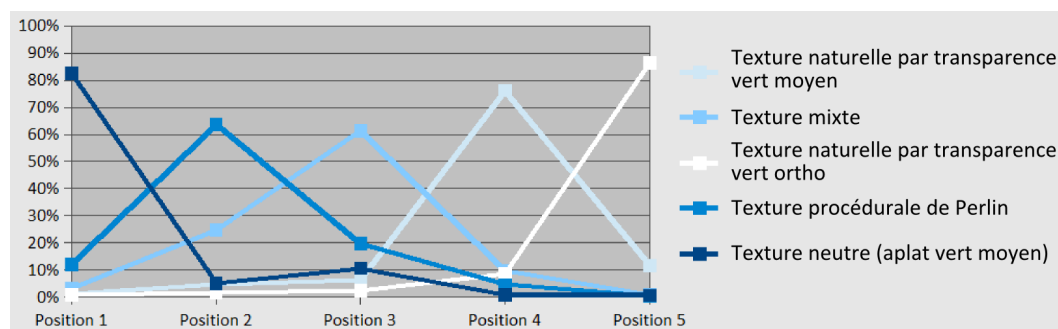


FIGURE C.62 : Ordonnement des symbolisations par les participants

Nous obtenons correspondance complète entre la place qui a été choisie majoritairement pour une représentation donnée et la représentation qui a majoritairement été choisie pour une place donnée : les maximums des colonnes correspondent tous aux maximums des lignes dans le tableau C.61. Cela nous permet de reconstruire un premier continuum majoritaire présenté à la figure C.63 et confirme l'existence d'un degré de photoréalisme perçu partagé permettant d'ordonner des symbolisations différentes.

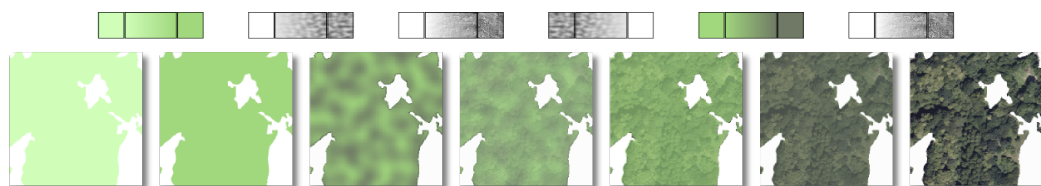


FIGURE C.63 : Reconstitution d'un continuum majoritaire

La construction du continuum majoritaire de la figure C.63 nous permet également de déduire une combinaison de briques d'interpolation de symbolisation pour passer d'une texture neutre de couleur vert clair à un extrait d'orthophotographie. Ces briques sont indiquées entre les symbolisations de la figure C.63 et s'enchaînent ainsi : une brique de texturation procédurale, une brique de transparence, une brique de texturation procédurale, une brique de coloration et une brique de transparence.

C.3.6.2 Construire des chemins élémentaires

Les réponses des participants concernant la construction de continuums élémentaires ont été analysés de gauche à droite conformément à ce qui était indiqué dans l'énoncé.

5b - Couleur VS Transparence Le résultat de sélection d'une symbolisation pour passer d'un aplat vert clair à une texture naturelle de couleur naturelle est plutôt unanime : 93% des participants ont choisi de passer par une texture naturelle de couleur vert clair (Cf. figure C.64). En conséquence, nous en déduisons que pour former le chemin graphique considéré, il faut d'abord utiliser la brique d'interpolation de transparence puis la brique d'interpolation de la couleur.



FIGURE C.64 : Résultats de la question 5b

5c - Couleur VS Transparence Le résultat de sélection d'une symbolisation pour passer d'un aplat vert clair à une texture naturelle de couleur abstraite (violet) confirme le résultat précédent : 83% des participants ont choisi de passer par une texture naturelle de couleur vert clair (Cf. figure C.65). En conséquence, nous en déduisons que pour former le chemin graphique considéré, il faut d'abord utiliser la brique d'interpolation de transparence puis la brique d'interpolation de la couleur.



FIGURE C.65 : Résultats de la question 5c

5d - Couleur VS Perlin Le résultat de sélection d'une symbolisation pour passer d'un aplat vert clair à une texture procédurale de Perlin est très mitigé : 53% des participants ont choisi de passer par une texture procédurale de Perlin composée de couleurs moins naturelles que l'extrémité B, tandis que 47% des participants ont choisi de passer par un aplat de couleur plus réaliste que l'extrémité A (Cf. figure C.66). Ce résultat mitigé ne nous permet pas de privilégier une combinaison de briques d'interpolation plutôt qu'une autre.

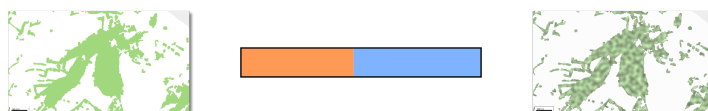


FIGURE C.66 : Résultats de la question 5d

5e - Couleur VS Perlin Le résultat de sélection d'une symbolisation pour passer d'un aplat vert clair à une texture procédurale de Perlin composée de couleur totalement abstraite est plus prononcé qu'à la question précédente : 72% des participants ont choisi de passer par une texture procédurale de Perlin composée de couleurs naturelles (Cf. figure C.67). L'utilisation d'une couleur abstraite pour une des extrémités et pour une des symbolisations à sélectionner, a forcé les participants à décorréler les paramètres de texture et de couleur. Ce résultat plus marqué nous permet de déduire que pour former le chemin graphique considéré, il faut d'abord utiliser la brique de texturation procédurale puis la brique de coloration de la texture de Perlin.

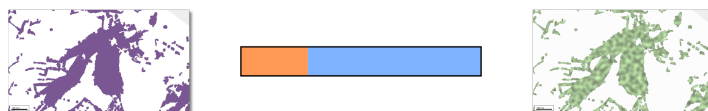


FIGURE C.67 : Résultats de la question 5e

5f - Couleur de Perlin VS Transparence de Perlin Le résultat de sélection d'une symbolisation pour passer d'une texture procédurale de Perlin de couleurs claires à une texture mixte de couleurs naturelles est plutôt unanime : 88% des participants ont choisi de passer par une texture mixte de couleurs claires (Cf. figure C.68). En conséquence, nous en déduisons que pour former le chemin graphique considéré, il faut d'abord utiliser la brique d'interpolation de transparence puis la brique de coloration de la texture de Perlin.



FIGURE C.68 : Résultats de la question 5f

5g - Couleur de Perlin VS Transparence de Perlin Le résultat de sélection d'une symbolisation pour passer d'une texture procédurale de Perlin de couleurs réalistes à une texture mixte de couleurs abstraites (violette) va dans le même sens que celui de la question précédente mais il est plus mitigé : 62% des participants ont choisi de passer par une texture mixte de couleurs réalistes (Cf. figure C.69). En conséquence, nous en déduisons que pour former le chemin graphique considéré, il faut également utiliser d'abord la brique d'interpolation de transparence puis la brique de coloration de la texture de Perlin.

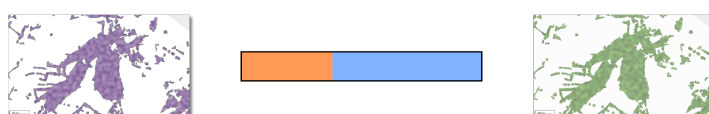


FIGURE C.69 : Résultats de la question 5g

Synthèse sur la combinaison de briques d'interpolation La figure C.70 synthétise graphique les choix de symbolisations pivots pour les six chemins graphiques à construire : pour chaque chemin à construire, les deux combinaisons possibles sont présentées et celle dont la symbolisation pivot a été sélectionnée majoritairement a été entourée en bleu. Dans tous les cas, c'est la combinaison faisant d'abord apparaître plus d'effets de texture qui a été sélectionnée majoritairement.

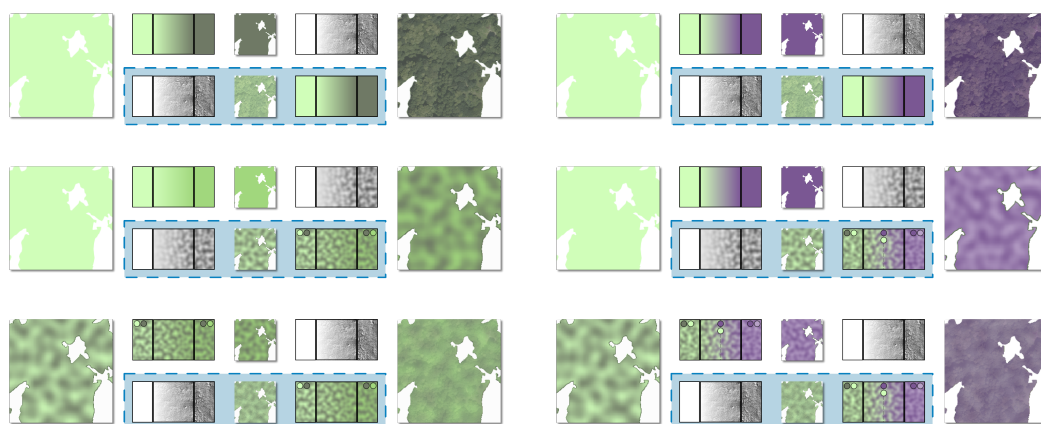


FIGURE C.70 : Synthèse des résultats des questions 5b à 5g

C.3.7 Question 6 - Validation de l'ordre d'un continuum donné

Le tableau C.71 à double entrée présente le nombre de fois qu'une représentation a été choisie pour une position donnée et inversement.







	1	2	3	4	5	6
						
Position 1	248	8	4	8	16	27
Position 2	11	234	23	19	17	7
Position 3	9	23	208	64	4	3
Position 4	12	23	66	196	8	6
Position 5	11	18	9	17	219	37
Position 6	20	5	1	7	47	231

FIGURE C.71 : Nombre d'apparition des cartes dans les différentes positions de la série

Le sens du continuum à créer n'était pas précisé dans la question, donc les participants avaient la possibilité de créer un continuum du plus photoréaliste au moins photoréaliste ou l'inverse. Dans le tableau de la figure C.71, les représentations disponibles ont été ordonnées dans l'ordre induit par l'utilisation des briques d'interpolation utilisées pour créer le continuum à tester. L'objectif de la question était donc de vérifier si les participants ordonnaient les représentations dans cet ordre ou dans l'ordre inverse. Les deux diagonales du tableau ont donc été mises en évidence pour vérifier si les représentations étaient bien ordonnables. Dans l'ensemble, il semble que les représentations aient été classées dans l'ordre dans lequel elles ont été construites. Ce qui est surprenant, c'est que l'orthophotographie n'est pas positionnée en extrémité dans une bonne partie des séries créées par les participants (53 séries sur 311, soit environ 17%).

Pour valider ces résultats, nous avons analysé les séries créées par les participants. La figure C.72 présente les parts de participants (en pourcentage) ayant créé les principales séries. Parmi les quatre séries les plus représentatives, on retrouve bien les deux qui sont dans l'ordre de création initial, et deux autres qui présentent une seule inversion de représentations. Notre hypothèse de travail selon laquelle l'utilisation de briques d'interpolation permet de créer un continuum de symbolisations ordonnables selon leur degré de photoréalisme est donc vérifiée.

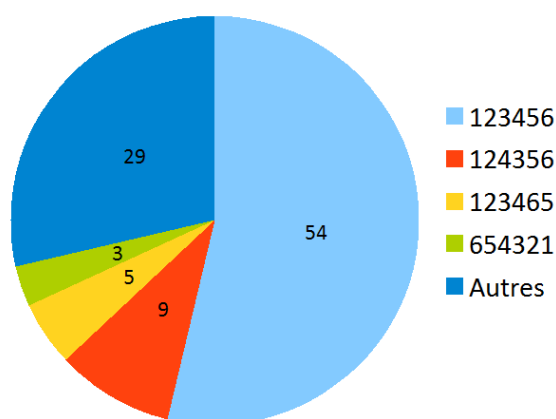


FIGURE C.72 : Séries créées par les participants dans lesquelles les cartes sont numérotées comme dans le tableau de la figure C.71, en pourcentage des réponses des participants.

C.3.8 Question 7 - Paramétrer le degré de photoréalisme au sein d'une représentation complète

La position des curseurs a été enregistrée sous la forme d'une valeur de degré de photoréalisme de la symbolisation choisie par les participants, comprise entre 0 et 100 avec un pas de 5. Le tableau de la figure C.73 récapitule pour les différentes représentations cartographiques présentées comme étant à paramétrer, les moyennes et écarts-types du degré de photoréalisme des symbolisations paramétrées.

Questions	7a	7b	7c	7d	7e
Moyennes	73	84	27	39	78
Ecarts-types	22	21	34	30	20

FIGURE C.73 : Résultats de la question 7

Les figures C.74, C.75, C.76, C.77 et C.78 présentent les représentations des questions avec une symbolisation de la végétation paramétrée avec les valeurs moyennes des réponses des participants.

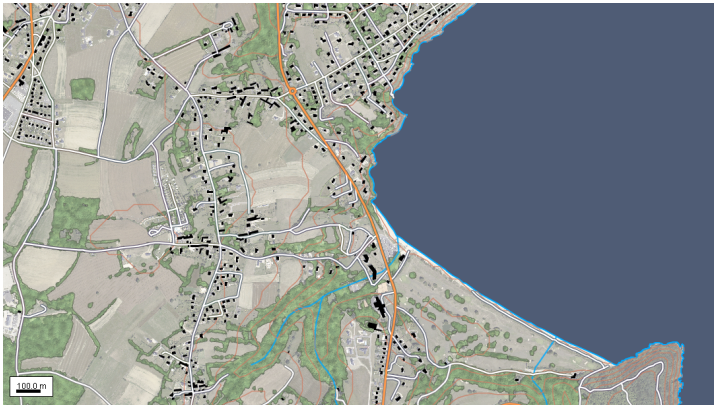


FIGURE C.74 : Représentation de la question 7a avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.



FIGURE C.75 : Représentation de la question 7b avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.

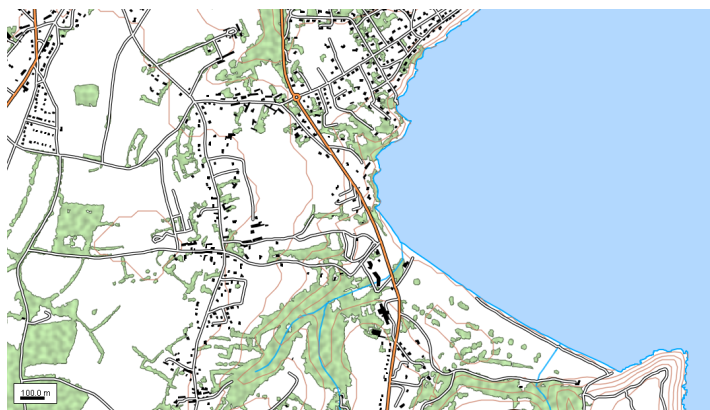


FIGURE C.76 : Représentation de la question 7c avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.

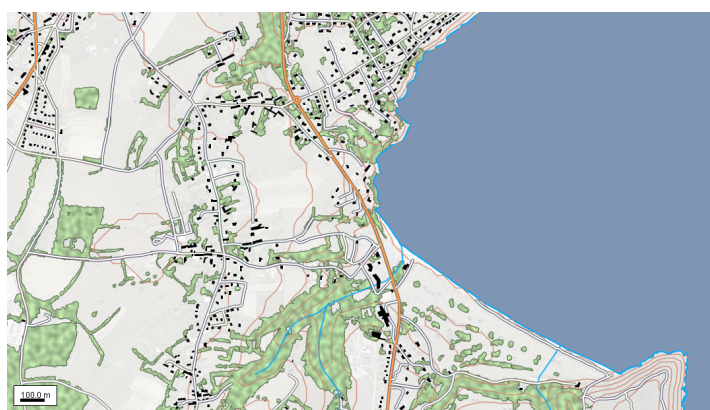


FIGURE C.77 : Représentation de la question 7d avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.



FIGURE C.78 : Représentation de la question 7e avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.

Enfin, la figure C.79 illustre l'évolution du degré de photoréalisme de la symbolisation paramétrée au regard du degré de photoréalisme des représentations proposées.

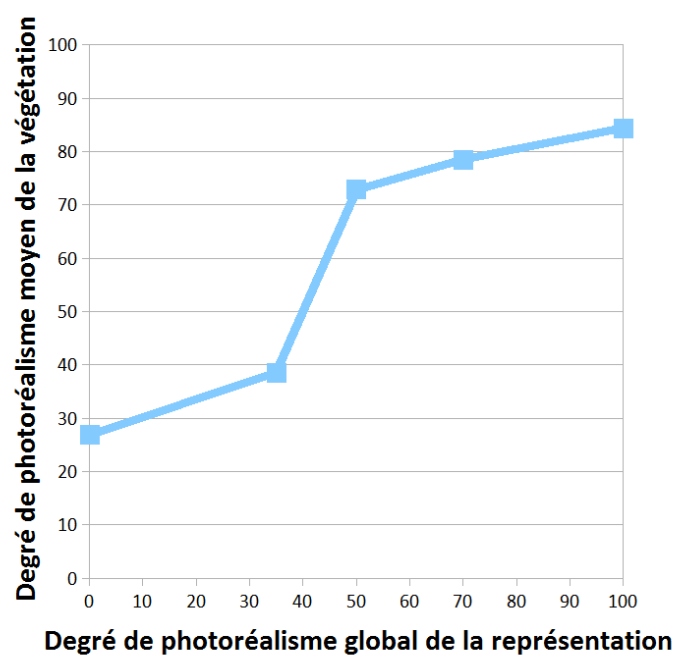


FIGURE C.79 : Évolution du degré de photoréalisme de la symbolisation de la végétation paramétrée par les utilisateurs, au regard du degré de photoréalisme des représentations de support.

Bibliographie

- ACROSSAIR (2011). Nearest tube application for iphone. http://www.acrossair.com/acrossair_app_augmented_reality_nearesttube_london_for_iPhone_3GS.htm. Pages 24 et 258
- AGARWALA, A., AGRAWALA, M., COHEN, M., SALESIN, D. et SZELISKI, R. (2006). Photographing long scenes with multi-viewpoint panoramas. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 25, pages 853–861. ACM. Pages 22 et 258
- ALBERTZ, J. et LEHMANN, H. (2005). *Kartographie und Fernerkundung - Stationen einer Entwicklung über acht Jahrzehnte*. Begleitheft zur Ausstellung der Kommission » Kartographie und Fernerkundung « - Deutsche Gesellschaft für Kartographie e.V., 21.- bis 23. September 2005. Pages 60, 61, et 260
- ALVINA, J., APPERT, C., CHAPUIS, O. et PIETRIGA, E. (2014). Routelens : Easy route following for map applications. In *Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '14*, pages 125–128, Como, Italy. ACM. Pages 30 et 259
- APPLETON, K., LOVETT, A., SÜNNENBERG, G. et DOCKERTY, T. (2002). Rural landscape visualisation from GIS databases : a comparison of approaches, options and problems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(2–3): 141–162. Page 78
- ARBELOT, B. (2012). Programmable generation of 2d vector textures. Mémoire de D.E.A., Université de Grenoble. Pages 81 et 260
- AUBRY, M., RUSSELL, B. C. et SIVIC, J. (2014). Painting-to-3d model alignment via discriminative visual elements. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33(2):14. Page 23
- AZUMA, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Teleoperators and Virtual Environments*, pages 355–385. Page 24
- BARLA, P. (2006). *Representation and acquisition models for expressive rendering*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. Pages 80 et 260
- BARTHES, R. (1961). Le message photographique. *Communications*, 1(1):127–138. Page 69
- BAZIN, A. (1945). Ontologie de l'image photographique. *Qu'est-ce que le cinéma ?*, pages 9–17. Page 69
- BECONYTE, G. (2011). Cartographic Styles : criteria and parameters. In *25th International Cartographic Conference*, Paris, France. Page 61
- BÉGUIN, M. et PUMAIN, D. (2010). *La représentation des données géographiques. Statistique et cartographie*. Armand Colin, Paris, 3ème édition. Pages 8 et 13

- BEKTAS, K. et ÇÖLTEKIN, A. (2012). Area of Interest Based Interaction and GeoVisualization with WebGL. *In Proceedings of The Graphical Web Conference 2012*. Pages 41, 42, et 259
- BEKTAS, K., ÇÖLTEKIN, A., KRÜGER, J. et DUCHOWSKI, A. (2015). Combined Visual Perception Models for Geographic Gaze Contingent Displays. *In 17th Annual Eurographics Conference on Visualization (EuroVis)*. Pages 41, 42, et 259
- BÉNARD, P., THOLLOT, J. et SILLION, F. X. (2009). Quality Assessment of Fractalized NPR Textures : a Perceptual Objective Metric. *In KATERINA MANIA, Bernhard E. Riecke, S. N. S. B. B. et O'SULLIVAN, C., éditeurs : 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV)*, pages 117–120, Chania, Crete, Greece. ACM Press. Pages 74 et 260
- BERNABÉ-POVEDA, M. A., SÁNCHEZ-ORTEGA, I. et ÇÖLTEKIN, A. (2011). Techniques for highlighting relief on orthoimaginery. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 21(0):346 – 352. International Conference : Spatial Thinking and Geographic Information Sciences 2011. Page 192
- BERNABÉ-POVEDA, M.-A. et ÇÖLTEKIN, A. (2014). Prevalence of the terrain reversal effect in satellite imagery. *International Journal of Digital Earth*, 7:1–16. Pages 189 et 192
- BERTIN, J. (1967). *Sémiologie graphique : Les diagrammes, Les réseaux, Les cartes*. Mouton, Gauthier-Villars, Paris. Pages 54, 56, 57, 64, et 260
- BERTIN, J. (1977). *La graphique et le traitement graphique de l'information*. Flammarion. Pages 145 et 230
- BESSADOK, F. et DOMINGUÈS, C. (2011). Automatic evaluation and improvement of map readability. *In 25th International Cartographic Conference (ICC2011), 2011 July, 2-8, Paris, France*. Page 61
- BIANCHIN, A. (2007). Theoretical cartography issues in the face of new representations. *In 23th International Cartographic Conference, Moscow, Russia*. Page 69
- BILJECKI, F., LEDOUX, H., STOTER, J. et ZHAO, J. (2014). Formalisation of the level of detail in 3d city modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48:1–15. Pages 69 et 76
- BOARD, C. (1972). *Cartographic Communication*, pages 37–47. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. ... Page 8
- BOÉR, A., ÇÖLTEKIN, A. et CLARK, K. (2013). An evaluation of web-based geovisualitaations for different levels of abstraction and realism - what do users predict. *In 26th International Cartographic Conference, Dresden, Germany*. Pages 11, 69, et 78
- BOER, A. D., DIAS, E. et VERBREE, E. (2008). *Processing 3D Geo-Information for Augmenting Georeferenced and Oriented Photographs with Text Labels*, pages 351–365. Springer Berlin Heidelberg. Page 25
- BOUSSEAU, A., KAPLAN, M., THOLLOT, J. et SILLION, F. X. (2006). Interactive watercolor rendering with temporal coherence and abstraction. *In Proceedings of the 4th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, pages 141–149. ACM. Pages 68 et 260
- BRASEBIN, M. (2014). *Les données géographiques 3D pour simuler l'impact de la réglementation urbaine sur la morphologie du bâti*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, IGN. Page 72
- BRÉDIF, M. (2013). Image-based rendering of lod1 3d city models for traffic-augmented immersive street-view navigation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1(3):7–11. Page 43

- BRÉDIF, M. (2014). Projective texturing uncertain geometry : silhouette-aware box-filtered blending using integral radial images. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1:17–23. ... Page 43
- BREWER, C. A. (1999). Color use guidelines for data representation. *In Proceedings of the Section on Statistical Graphics, American Statistical Association*, pages 55–60. Pages 82, 128, et 260
- BRUNET, R. (1973). Structure et dynamisme de l'espace français : schéma d'un système. *Espace géographique*, 2(4):249–254. Pages 66 et 260
- BRUNET, R. (1980). La composition des modèles dans l'analyse spatiale. *Espace géographique*, 9(4):253–265. Page 65
- BRUNET, R. (1986). La carte-modèle et les chorèmes. *Mappemonde*, 86(4):2–6. Page 65
- BRYSON, S. (1996). Virtual reality in scientific visualization. *Commun. ACM*, 39(5):62–71. Page 24
- BUARD, E. (2013). *Dynamiques des interactions espèces-espace. Mise en relation des pratiques de déplacement des populations d'herbivores et de l'évolution de l'occupation du sol dans le parc de Hwange (Zimbabwe)*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris. Page 10
- BUARD, E. et RUAS, A. (2009). Processes for improving the colours of topographic maps in the context of map-on-demand. *In 24th International Cartographic Conference (ICC'09)*, Santiago, Chile. Page 32
- BUCHER, B., BRASEBON, M., BUARD, E., GROSSO, E., MUSTIÈRE, S. et PERRET, J. (2012). Geoxygene : Built on top of the expertise of the french nma to host and share advanced gi science research results. *In BOCHER, E. et NETELER, M., éditeurs : Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, chapitre 2, pages 21–33. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. Page 158
- CABANIER, R. et ANDRONIKOS, N. (2015). Compositing and blending level 1 - w3 candidate recommendation. Pages 107 et 261
- CARTER, J. R. (2005). The many dimensions of map use. *In 22th International Cartographic Conference*, La Coruña, Espagne. Page 11
- CAUVIN, C. (1997). Au sujet des transformations cartographiques de position. *Cybergeog : European Journal of Geography*. Page 65
- CFC (1990). Glossaire de Cartographie. *Bulletin du Comité Français de Cartographie*, 123-124. Pages 8, 13, 14, et 15
- CHESNEAU, E. (2006). *Modèle d'amélioration automatique des contrastes de couleurs en cartographie - Application aux cartes de risque*. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée. Page 61
- CHRISMONT, A. (2010). *Couleur & colorimétrie*. Éd. 2C Color Consulting. Page 88
- CHRISTOPHE, S. (2009). *Aide à la conception de légendes personnalisées et originales : Proposition d'une méthode coopérative pour le choix des couleurs*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Paris. Pages 32, 80, et 98
- CHRISTOPHE, S. et HOARAU, C. (2012). Expressive map design based on pop art : revisit of graphic semiology ? *Cartographic Perspectives*, 73:61–74. Page 129
- CHRISTOPHE, S., PERRET, J. et HOARAU, C. (2013). Extraction de palettes de couleurs pour l'aide à la conception cartographique. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information (RSTI), Série Technique et Science Informatiques (TSI), Art et Informatique*, 32(3-4):145–152. Pages 80, 98, 101, et 115

- CIE (1976). Commission Internationale de l'Eclairage Proceedings. Rapport technique, Cambridge University Press, Cambridge. Page 87
- COCKBURN, A., KARLSON, A. et BEDERSON, B. B. (2009). A review of Overview+Detail, zooming, and Focus+Context interfaces. *ACM Comput. Surv.*, 41(1):1–31. Page 41
- ÇÖLTEKIN, A. et HAGGRÉN, H. (2006). Stereo foveation. *Photogrammetric Journal of Finland*, 20:1. pas de citations
- CROMBEZ, N., CARON, G. et MOUADDIB, E. M. (2013). Colorisation photo-réaliste de nuages de points 3D. In *Orasis, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*, Cluny, France. Page 69
- CROMPVOETS, J., BREGT, A., RAJABIFARD, A. et WILLIAMSON, I. (2004). Assessing the worldwide developments of national spatial data clearinghouses. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(7):665–689. Page 16
- CRON, J. (2011). 3d-effekte in der 2d-kartografie. systematische untersuchung und automatisierte symbolisierung der kartenelemente. Mémoire de D.E.A., Université de Salzburgh. Page 73
- DACHSBACHER, C., BOLCH, T. et STAMMINGER, M. (2006). Procedural Reproduction of Terrain Textures with Geographic Data. In AACH, T. et WESTERMANN, R., éditeurs : *Vision, Modeling and Visualization (VMV 2006)*, pages 105–112, Aachen, Allemagne. IOS Press. Page 69
- DECARLO, D. et SANTELLA, A. (2002). Stylization and abstraction of photographs. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 21, pages 769–776. ACM. Page 67
- DEMIRALP, c., BERNSTEIN, M. et HEER, J. (2014). Perceptual kernels for visualization design. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. InfoVis)*. Page 57
- DEVAUX, A., BRÉDIF, M. et PAPARODITIS, N. (2012). A web-based 3d mapping application using WebGL allowing interaction with images, point clouds and models. In *Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pages 586–588. ACM. Page 43
- DHEE, F. (2013). *Cartographie pour les déficients visuels de la couleur. Propositions d'amélioration des cartes pour les daltoniens*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 - Panthéon Sorbonne. Page 32
- DÖLLNER, J., BAUMANN, K. et BUCHHOLZ, H. (2006). Virtual 3d city models as foundation of complex urban information spaces. In SCHRENK, M., éditeur : *11th international conference on Urban Planning and Spatial Development in the Information Society (REAL CORP)*, pages 107–112. CORP – Competence Center of Urban and Regional Planning. Page 76
- DOMINGUÈS, C. et BALDIT-SCHNELLER, P. (2010). Les randonneurs définissent leurs cartes : exploitation d'une enquête semi-directive à questions ouvertes avec des outils statistiques et linguistiques. In *Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale SAGEO'10*. Page 32
- DOMINGUÈS, C., CHRISTOPHE, S. et JOLIVET, L. (2009). Connaissances opérationnelles pour la conception automatique de légendes de cartes. In *20es Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC2009)*, pages 253–264. PUG. Page 98
- DOMINGUÈS, C., CORBY, O. et SOUALAH-ALILA, F. (2012). Raisonner sur une ontologie cartographique pour concevoir des légendes de cartes. In *Extraction et gestion des connaissances (EGC'2012)*, RNTI E.23, pages 309–314. Hermann. Page 32

- DOMINGUÈS, C. et HOARAU, C. (2011). On-demand cartography for trekkers. *In Advances in Cartography and GIScience Vol.1, LNG&C, Selection from 25th International Cartographic Conference (ICC'11)*, volume 1, pages 183–223, Paris, France. ACI. Page 32
- DONG, W., LIAO, H., ROTH, R. E. et WANG, S. (2014). Eye tracking to explore the potential of enhanced imagery basemaps in web mapping. *The Cartographic Journal*, 51(4):313–329. Page 78
- DONNAY, J.-P. (2000). *Nature et Qualités de la Spatiocartographie*, volume 38, pages 11–23. Pages 60, 63, 64, 69, et 85
- DUCHÊNE, C. (2004). *Généralisation Cartographique par Agents Communicants : le modèle CartACom*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, France. Page 201
- DUMENIEU, B., RUAS, A. et PERRET, J. (2013). Une méthode de construction de données spatio-temporelles pour l'étude de l'espace urbain ancien. *In SAGEO 2013*. Page 10
- ENGEL, J., SEMMO, A., TRAPP, M. et DÖLLNER, J. (2013). Evaluating the perceptual impact of rendering techniques on thematic color mappings in 3d virtual environments. *In MICHAEL BRONSTEIN, J. F. et HORMANN, K., éditeurs : Proceedings of 18th International Workshop on Vision, Modeling and Visualization (VMV 2013)*, pages 25–32. The Eurographics Association. Page 78
- ESCRIHUELA, T. (2013). Méthodes de résolution pour la visualisation des toponymes - création de propositions de rendus selon différents contextes d'affichage. Mémoire de D.E.A., ENSG, Université Paris I Panthéon Sorbonne, Université Paris VII Diderot, Laboratoire COGIT, IGN. Pages 190, 191, et 263
- ETAT FRANÇAIS (2010). *Vocabulaire de l'équipement et des transports (liste de termes, expressions et définitions adoptés)*. Journal officiel de la République française - JORF 0153 du 4 juillet 2010, page 12208, texte 54. Direction de l'information légale et administrative, Paris. Page 5
- FABRIKANT, S. I. (2011). Géovisualisation : cartographier les phénomènes évolutifs. Du cognitif au sensitif. Ecole d'été du GDR MAGIS. Pages 58, 59, et 260
- FERWERDA, J. A. (2003). Three varieties of realism in computer graphics. *In Electronic Imaging 2003*, pages 290–297. International Society for Optics and Photonics. Page 70
- FEYT, G. (2011). Géomatique et fond de carte, vers un enrichissement mutuel : application à la contextualisation des problématiques territoriales. *In 25th International Cartographic Conference*, Paris, France. Page 11
- FIELD, K. et DEMAJ, D. (2012). Reasserting design relevance in cartography : some concepts. *The Cartographic Journal*, 49(1):70–76. Pages 61, 62, et 260
- FUND, M. (2012). Exploitable des bases de données 3d pour le calcul d'indicateurs urbains 3d. Mémoire de D.E.A., M2 Information Géographique & M2 Génie urbain, Université Paris Est MLV, ENSG. Pages 22 et 258
- GAFFURI, J. (2008). *Généralisation automatique pour la prise en compte de thèmes champs : le modèle GAEL*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est. Pages 201 et 264
- GEISTHÖVEL, R. et HURNI, L. (2013). Toward automatic swiss style rock depiction. *In 26th International Cartographic Conference*, Dresden, Germany. Page 75
- GHADIRIAN, P. et BISHOP, I. D. (2008). Integration of augmented reality and GIS : A new approach to realistic landscape visualisation. *Landscape and Urban Planning*, 86(3-4):226–232. Page 72

- GILGEN, J. et JENNY, B. (2010). Digital rock and scree drawing in vector and raster mode. *Geographia Technica, Special Issue*, 12:24–31. Pages 75 et 260
- GIRRES, J.-F. (2012). *Modèle d'estimation de l'imprécision des mesures géométriques de données géographiques. Application aux mesures de longueur et de surface*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est. Page 7
- GLANDER, T., TRAPP, M. et DÖLLNER, J. (2007). A concept of effective landmark depiction in geovirtual 3d environments by view-dependent deformation. *In Proceedings of the 4th International Symposium on LBS and Telecartography*. CD proceedings. Page 60
- GONZATO, J.-C., ARCILA, T. et CRESPIAN, B. (2008). Virtual Objects on Real Oceans. *In Proceedings of GRAPHICON'08*, pages 49–54, Moscou, Russie. Page 25
- GRABLER, F., AGRAWALA, M., SUMNER, R. W. et PAULY, M. (2008). Automatic generation of tourist maps. *In SIGGRAPH '08 : ACM SIGGRAPH 2008 papers*, pages 1–11, New York, NY, USA. ACM. Pages 22, 60, et 258
- GRESSIN, A., MALLET, C., VINCENT, N. et PAPARODITIS, N. (2014). Updating the new French national land cover database. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Québec City, Canada. Pages 28 et 259
- HAGEDORN, B. et DÖLLNER, J. (2008). Sketch-based navigation in 3d virtual environments. *In Smart Graphics*, pages 239–246. Springer. Page 44
- HARRIE, L., MUSTIÈRE, S. et STIGMAR, H. (2011). Cartographic quality issues for view services in geoportals. *Cartographica*, 46(2):92–100. Page 61
- HARROWER, M. A. et BREWER, C. A. (2003). ColorBrewer.org : An Online Tool for Selecting Color Schemes for Maps. *The Cartographic Journal*, 40(1):27–37. Page 32
- HERLING, J. et BROLL, W. (2010). Advanced self-contained object removal for realizing real-time Diminished Reality in unconstrained environments. *In 9th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2010)*, 13-16 October 2010, pages 207–212, Seoul, Korea. Page 24
- HOARAU, C. (2012). Orthoimage or map visualization in use in geoportals. case study on the french geoportal. *In 17th AutoCarto Conference (AutoCarto'12)*, Columbus, Ohio, USA. Page 44
- HOARAU, C. et MUSTIÈRE, S. (2011). GeOxygene, 'Semiology' Plugin - Base model for works on map legends in GeOxygene. Rapport technique. Page 164
- HUGUES, O., CIEUTAT, J.-M. et GUITTON, P. (2011). *GIS and Augmented Reality : State of the Art and Issues*, chapitre 33, pages 721–740. Springer. Page 24
- HUGUES, O., CIEUTAT, J.-M., PILNIÈRE, V. et GUITTON, P. (2010). SIG Maritime Augmenté (SIGMA) Un système Enactif de Réalité Augmentée. *In 12e Conférence Internationale en Ergonomie et Informatique Avancée (Ergo'IA 2010)*, Bidart, 64, France. Page 25
- HURTUT, T. et LECORDIX, F. (2011). Cartography of mountain rocky areas, a statistical modeling and drawing of element arrangements. *In 25th International Cartographic Conference - Proceedings of the 12th meeting of the ICA Commission on Mountain Cartography*, Paris. Pages 75 et 260
- HUZTLER, G., GORTAIS, B. et RENAULT, V. (1998). Point et ligne sur plan : des agents qui communiquent visuellement. *In BARTHÈS, J. P., CHEVRIER, V. et BRASSAC, C., éditeurs : Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, pages 191–204, Paris. Hermès. Page 56

- ISENBERG, T. (2013). Visual Abstraction and Stylisation of Maps. *The Cartographic Journal*, 50(1):8–18. . Page 66
- JENNY, B. (2006). Geometric distortion of schematic network maps. *Bulletin of the Society of Cartographers*, 40(1):15–18. Page 65
- JENNY, B. (2012). Adaptive composite map projections. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 18(12):2575–2582. Page 43
- JENNY, B., BUDDENBERG, J., HOARAU, C. et LIEM, J. (2015). Plan oblique relief for web map. *Cartography and Geographic Information Science*. Page 193
- JENNY, B., GILGEN, J., GEISTHÖVEL, R., MARSTON, B. E. et HURNI, L. (2014). Design principles for swiss-style rock drawing. *The Cartographic Journal*. Page 75
- JENNY, B., HUTZLER, E. et HURNI, L. (2010a). Point pattern synthesis. *The Cartographic Journal*, 47(3):257–261. Pages 75 et 260
- JENNY, B., HUTZLER, E. et HURNI, L. (2010b). Scree representation on topographic maps. *The Cartographic Journal*, 47(2):141–149. Pages 75 et 260
- JENNY, B. et PATTERSON, T. (2007). Introducing plan oblique relief. *Cartographic Perspectives*, (57):21–40. Page 193
- JENNY, H. et JENNY, B. (2013). Challenges in adapting example-based texture synthesis for panoramic map creation : a case study. *Cartography and Geographic Information Science*, 40(4):297–304. Pages 79, 80, et 260
- JENNY, H., JENNY, B., CARTWRIGHT, W. et LURNI, L. (2011a). *Creating panoramic strip format maps using interactive terrain deformation*, pages 41–50. Wichmann. Pages 21, 22, et 258
- JENNY, H., JENNY, B., CARTWRIGHT, W. E. et HURNI, L. (2011b). Interactive local terrain deformation inspired by hand-painted panoramas. *The Cartographic Journal*, 48(1):11–20. Pages 21 et 258
- JENNY, H., JENNY, B. et CRON, J. (2012). Exploring transition textures for pseudo-natural maps. In JEKEL, T., CAR, A., STROBL, J. et GRIESEBNER, G., éditeurs : *GI_Forum 2012 : Geovisualization, Society and Learning*, pages 130–139, Berlin. Wichmann. Pages 72, 110, et 192
- JENNY, H., JENNY, B. et HURNI, L. (2010c). Interactive design of 3d maps with progressive projection. *The Cartographic Journal*, 47(3):211–221. Pages 23 et 258
- JÉGOU, L. (2013). *Vers une nouvelle prise en compte de l'esthétique dans la composition de la carte thématique : propositions de méthodes et d'outils*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 2. Page 90
- JÉGOU, L. (2014). Une approche esthétique pour l'enseignement de la composition de gradients colorés. *Cartes et géomatique : revue du Comité français de cartographie, Numéro spécial "Enseigner la sémiologie"*, 222:139–147. Page 128
- JOLIVEAU, T. (2005). Voir le monde comme il paraît ou le rôle des visualisations réalistes dans la gestion territoriale. In *Colloque pluridisciplinaire international*. Page 78
- JOLIVEAU, T. (2011). Géomatique et géonumérisation. <http://mondegeonumerique.wordpress.com/geomatique-et-cie/geomatique-et-geonumerisation/>. Consulté le 25/09/2014. Page 2
- JOLIVEAU, T. (2014a). Possibilité d'un leurre géonumérique. Page 79
- JOLIVEAU, T. (2014b). Quelle expérience géographique à l'heure du géoweb ? In *FOSS4G-FR*. Page 36

- KANDINSKY, W. (1991). Point et ligne sur plan. *Folio essais*, Gallimard. Page 56
- KARRAY, F., ALEMZADEH, M., SALEH, J. A. et ARAB, M. N. (2008). Human-Computer Interaction : Overview on State of the Art. *International journal on smart sensing and intelligent systems*, 1(1):137–159. Page 30
- KARSCH, K., HEDAU, V., FORSYTH, D. et HOIEM, D. (2011). Rendering Synthetic Objects into Legacy Photographs. *ACM Trans. Graph. (Proceedings of ACM SIGGRAPH ASIA)*, 30(6). Page 25
- KEATES, J. S. (1982). *Understanding maps*. Page 66
- KNOWLTON, J. (1966). On the definition of “picture”. *AV communication review*, 14(2):157–183. ... Pages 58 et 66
- KRÖGER, J., SCHIEWE, J. et WENINGER, B. (2013). Analysis and improvement of the openstreetmap street color scheme for users with color vision deficiencies. *In 26th International Cartographic Conference*, Dresden, Germany. Page 32
- KYPRIANIDIS, J. E., COLLOMOSSE, J., WANG, T. et ISENBERG, T. (2013). State of the “Art” : A Taxonomy of Artistic Stylization Techniques for Images and Video. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(5):866–885. Page 68
- KYPRIANIDIS, J. E. et DÖLLNER, J. (2008). Image abstraction by structure adaptive filtering. *In TPCG*, pages 51–58. Page 67
- LAFARGE, F., GIMEL’FARB, G. et DESCOMBES, X. (2010). Geometric feature extraction by a multimarked point process. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 32(9):1597–1609. Page 69
- LAGAE, A., LEFEBVRE, S., COOK, R., DEROSE, T., DRETTAKIS, G., EBERT, D. S., LEWIS, J., PERLIN, K. et ZWICKER, M. (2010). State of the art in procedural noise functions. *EG 2010-State of the Art Reports*. . Page 70
- LANDES, P.-E., GALERNE, B. et HURTUT, T. (2013). A shape-aware model for discrete texture synthesis. *Computer Graphics Forum (Proc. EGSR)*, 32. Pages 75 et 260
- LANGLANDS, A. (2014). Physically Based Shader Design in Arnold. *In SIGGRAPH 2014 Course : Physically Based Shading in Theory and Practice*. Pages 70 et 260
- LAROUSSE (2010). *Le petit Larousse illustré : en couleurs : 87 000 articles, 5 000 illustrations, 321 cartes, chronologie universelle*. Larousse, Paris. Pages 3, 35, et 97
- LASRAM, A., LEFEBVRE, S. et DAMEZ, C. (2012). Scented Sliders for Procedural Textures. *Eurographics conf. proc. short paper*. Pages 76, 77, et 260
- LE CORRE, S. et JÉGOU, L. (2005). La Terre revisitée par la NASA. *M@ppemonde*, 78(2005.2). Page 69
- LIENG, H., TOMPKIN, J. et KAUTZ, J. (2012). Interactive multi-perspective imagery from photos and videos. *In Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics 2012)*, volume 31, pages 285–293. Page 23
- LOI, H. (2013). Color transfert based on summary statistics. Mémoire de D.E.A., Université de Grenoble. Pages 75 et 260
- LOI, H., HURTUT, T., VERGNE, R. et THOLLOT, J. (2013). Discrete texture design using a programmable approach. *In ACM SIGGRAPH 2013 Talks*, pages 43 :1–43 :1, Anaheim, California. ACM. Pages 74, 75, et 260
- LUPP, M. (2007). Styled layer descriptor implementation specification. *Open Geospatial Consortium Document Number : OGC 05-078r4, Version : 1.1.0*. Pages 123 et 164

- LYSÁK, J. et TRAUIG, M. (2013). Digital rock drawing on czech topographic maps : Present and future development. *In 26th International Cartographic Conference, Dresden, Germany.* Pages 75 et 260
- MACEachREN, A. M. (1994). *The Roles of Maps, from Some Truth with Maps : A Primer on Symbolization and Design.*, chapitre 3.6, pages 244–251. Wiley-Blackwell. Page 8
- MACEachREN, A. M. (1995). *How Maps Work : Representation, Visualization, and Design.* The Guilford Press, New York, 2nd édition. Pages 8, 56, 58, 59, 66, et 260
- MACEachREN, A. M., EDSALL, R., HAUG, D., BAXTER, R., OTTO, G., MASTERS, R., FUHRMANN, S. et QIAN, L. (1999). Virtual environments for geographic visualization : Potential and challenges. *In Proceedings of the 1999 workshop on new paradigms in information visualization and manipulation in conjunction with the eighth ACM international conference on Information and knowledge management*, pages 35–40. ACM. Page 69
- MACEachREN, A. M. et KRAAK, M.-J. (1997). Exploratory cartographic visualization : advancing the agenda. *Computers & Geosciences*, 23(4):335–343. Pages 9 et 30
- MACEachREN, A. M. et KRAAK, M.-J. (2001). Research challenges in geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 28(1):3–12. Page 9
- MCCLOUD, S. (1994). *Understanding Comics.* A Kitchen Sink book. HarperCollins. Pages 63 et 66
- MEDLEY, S. et HADDAD, H. (2011). The Realism Continuum, Representation and Perception. *The Journal of the Image*, 1. Page 76
- MERMET, E. (2011). *Aide à l'exploration des propriétés structurelles d'un réseau de transport : conception d'un modèle pour l'analyse, la visualisation et l'exploration d'un réseau de transport.* Thèse de doctorat, Université Paris-Est. Pages 82 et 260
- MILGRAM, P. et KISHINO, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12). Pages 23, 24, et 258
- MOLES, A. A. (1978). L'image et le texte. *Communication et langages*, 38(1):17–29. Page 69
- MONMONIER, M. (1993). *Comment faire mentir les cartes ? Du mauvais usage de la géographie.* France. .. Page 54
- MOWER, J. E. (2009). Creating and delivering augmented scenes. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(8):993–1011. Page 25
- MUEHLENHAUS, I. (2013). Four Rhetorical Styles of Persuasive Geocommunication : An Initial Taxonomy. *In Proceedings of the International Cartographic Conference, Dresden, Germany.* Page 54
- MÜLLER, M. (2006). Symbology encoding implementation specification. *Open Geospatial Consortium Document Number : OGC 05-077r4, Version : 1.1.0.* Pages 123 et 164
- MUSTIÈRE, S. (2001). *Apprentissage supervisé pour la généralisation cartographique.* Thèse de doctorat, Université Paris VI. Pages 65, 201, et 264
- MUSTIÈRE, S., SAITTA, L. et ZUCKER, J.-D. (2000). Abstraction in Cartographic Generalization. *In RAŚ, Z. et OHSUGA, S., éditeurs : Foundations of Intelligent Systems*, volume 1932 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 638–644. Springer Berlin Heidelberg. Page 63
- NÖTH, W. (1990). Handbook of semiotics. *Blooming : Indiana University Press.* Page 58

- ORY, J., CHRISTOPHE, S. et FABRIKANT, S. I. (2013). Identification of styles in topographic maps. *In 26th International Cartographic Conference (ICC 2013)*, Dresden, Germany. Page 61
- ORY, J., CHRISTOPHE, S., FABRIKANT, S. I. et BUCHER, B. (2014). Caractérisation visuelle d'un style topographique. *In Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2014)*. Pages 159 et 168
- OSTROMOUKHOV, V. (2002). *Survol de rendu non-photoréaliste (NPR)*, pages 217–250. Sillon, François X., hermes science édition. Page 68
- PALSKY, G. (1998). Origines et évolution de la cartographie thématique (XVIIe-XIXe siècles). *Revista da Faculdade de Letras. Geografia.*, 14(1):39–60. Pages 13 et 14
- PASEWALDT, S., SEMMO, A., TRAPP, M. et DÖLLNER, J. (2014). Multi-perspective 3d panoramas. *International Journal of Geographical Information Science (IJGIS)*, 28(10):2030–2051. Pages 23 et 258
- PASEWALDT, S., TRAPP, M. et DÖLLNER, J. (2011). Multiscale visualization of 3d geovirtual environments using view-dependent multi-perspective views. *Journal of WSCG*, 19(3):111–118. Pages 23 et 258
- PATTERSON, T. (2002). Getting real : Reflecting on the new look of national park service maps. *Cartographic Perspectives*, 0(43). Pages 72 et 192
- PEAKAR (2011). Peak ar - discover every peak everywhere. <http://peakar.salzburgresearch.at/>. Pages 25 et 259
- PEIRCE, C. S. (1978). *Ecrits sur le signe. Paris, Le Seuil (coll. L'ordre philosophique)*. rassemblés, traduits et commentés par Gérard Deledalle. Pages 58, 59, et 260
- PELLOIE, F. (2014). Vers une sémiologie graphique 3d appliquée à l'urbanisme. Mémoire de D.E.A., Master 1 Géographie spécialité Carthagéo, Université Paris 1. Page 72
- PERLIN, K. (1985). An image synthesizer. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 19(3):287–296. Pages 70, 71, 108, 164, et 260
- PIETRIGA, E. et APPERT, C. (2008). Sigma lenses : Focus-context transitions combining space, time and translucence. *In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '08*, pages 1343–1352, Florence, Italy. ACM. Page 41
- PINDAT, C., PIETRIGA, E., CHAPUIS, O. et PUECH, C. (2012). JellyLens : Content-Aware Adaptive Lenses. *In UIST - 25th Symposium on User Interface Software and Technology - 2012*, Proceedings of the 25th Symposium on User Interface Software and Technology, pages 261–270, Cambridge, MA, United States. ACM, ACM. Pages 41, 42, et 259
- PORTALÉS, C., LERMA, J. L. et NAVARRO, S. (2010). Augmented reality and photogrammetry : A synergy to visualize physical and virtual city environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1):134–142. Page 25
- PORTER, T. et DUFF, T. (1984). Compositing digital images. *In ACM Siggraph Computer Graphics*, volume 18, pages 253–259. ACM. Pages 104 et 106
- PUISSANT, A. (2003). *Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, Strasbourg. Page 11
- RAPOSO, P. et BREWER, C. (2013). Guidelines for Consistently Readable Topographic Vectors and Labels with Toggling Backgrounds. *In 26th International Cartographic Conference*, Dresden, Germany. ... Pages 60, 61, 119, 121, et 260

- RAPOSO, P. et BREWER, C. A. (2011). Comparison of topographic map designs for overlay on orthoimage backgrounds. *In 25th International Cartographic Conference*, Paris, France. Page 78
- REITMAYR, G., EADE, E. et DRUMMOND, T. (2005). Localisation and Interaction for Augmented Maps. *In Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR '05, pages 120–129, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. Pages 25 et 259
- ROBERT, L., REY-DEBOVE, J. et REY, A., éditeurs (2008). *Le nouveau petit Robert : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*. Le Robert, Paris. La jaquette plastique porte en plus : 60 000 mots, 300 000 sens. Pages 8, 9, 63, et 68
- ROBINSON, A. H. (1978). The uniqueness of the map. *The American Cartographer*, 5(1):5–7. Page 64
- ROBINSON, A. H., MORISON, J. L., MUEHRCKE, P. C., GUPTILL, S. C. et KIMERLING, A. J. (1995). *Elements of cartography, Sixth Edition*. John Wiley & Sons, Inc. Pages 8 et 66
- ROBINSON, A. H. et PETCHENICK, B. B. (1976). *The Nature of Maps*. Page 66
- ROSIN, P. et COLLOMOSSE, J. (2013). *Image and Video-Based Artistic Stylisation*, volume 42. Springer. ... Page 68
- ROTH, R. E. (2013). An empirically-derived taxonomy of interaction primitives for interactive cartography and geovisualization. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 19(12):2356–2365. Pages 11 et 31
- RUAS, A. (1999). *Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie*. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée. Page 201
- RUAS, A. (2007). Recherche en automatisation des processus cartographiques. *Le Monde des Cartes : revue du Comité français de cartographie*, 191:109–110. Page 98
- SAUVAGET, C. et BOYER, V. (2008). Comics stylization from photographs. *In Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Visual Computing*, ISVC '08, pages 1125–1134, Las Vegas, NV. Springer-Verlag. Page 67
- SAUVET, G. (1990). Les signes dans l'art mobilier. *In CLOTTES, J., éditeur : Colloque de Foix-Le Mas d'Azil (1987)*, pages 83–99. Page 56
- SAYEED, R. et HOWARD, T. (2006). State of the art non-photorealistic rendering (npr) techniques. *EG UK Theory and Practice of Computer Graphics*, pages 1–10. Page 68
- SCHMALSTIEG, D. et REITMAYR, G. (2005). The World as a User Interface : Augmented Reality for Ubiquitous Computing. *Central European Multimedia and Virtual Reality Conference*. Page 25
- SCHMALSTIEG, D. et REITMAYR, G. (2007). *Augmented Reality as a Medium for Cartography*, chapitre 19, pages 267–294. 2nd édition. Page 24
- SEMMO, A. et DÖLLNER, J. (2014a). Image filtering for interactive level-of-abstraction visualization of 3d scenes. *In Proceedings International Symposium on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization, and Imaging (CAe)*, pages 5–14. Pages 77 et 260
- SEMMO, A. et DÖLLNER, J. (2014b). An interaction framework for level-of-abstraction visualization of 3d geovirtual environments. *In Proceedings 2nd ACM SIGSPATIAL Workshop on MapInteraction*. Pages 77, 78, et 260
- SEMMO, A., KYPRIANIDIS, J. et DÖLLNER, J. (2010). Automated image-based abstraction of aerial images. *In PAINHO, M., SANTOS, M. Y. et PUNDT, H., éditeurs : Geospatial Thinking*, volume 0 de *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, pages 359–378. Springer Berlin Heidelberg. Pages 67 et 260

- SEMMO, A., KYPRIANIDIS, J. E., TRAPP, M. et DÖLLNER, J. (2013). Real-time rendering of water surfaces with cartography-oriented design. *In Proceedings International Symposium on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization, and Imaging (CAe)*, pages 5–14. Pages 77 et 260
- SEMMO, A., TRAPP, M., KYPRIANIDIS, J. E. et DÖLLNER, J. (2012). Interactive visualization of generalized virtual 3d city models using level-of-abstraction transitions. *Computer Graphics Forum*, 31(3):885–894. Proceedings EuroVis 2012. Pages 76, 77, et 260
- SIMSARIAN, K. T. et AKESSON, K. P. (1997). Windows on the World : An example of Augmented Virtuality. *In Interface 1997, Sixth International Conference Montpellier 1997 : Man-machine interaction*, pages 68–71. .. Pages 24 et 258
- SMITH, R. (2013). Partial automation of the cartographic design process. *In 26th International Cartographic Conference*, Dresden, Germany. Page 32
- STOLPER, C., KAHNG, M., LIN, Z., FOERSTER, F., GOEL, A., STASKO, J. et CHAU, D. H. (2014). Glo-stix : Graph-level operations for specifying techniques and interactive exploration. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 20(12):2320–2328. Page 82
- THOLLOT, J. (2008). *Expressive rendering, tools and algorithms for a better visual communication*. Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. Page 79
- TOOAMNIAN, A., HARRIE, L., MANSOURIAN, A. et PILESJO, P. (2014). Automatic integration of spatial data in viewing services. *Journal of Spatial Information Science*, (6):43–58. Page 61
- TOUYA, G. (2011). *Le Modèle CollaGen : Collaboration de processus automatiques pour la généralisation cartographique de paysages hétérogènes*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est. Pages 65, 201, et 260
- TRAPP, M., BEESK, C., PASEWALDT, S. et DÖLLNER, J. (2011a). Interactive rendering techniques for highlighting in 3d geovirtual environments. *In KOLBE, T. H., KÖNIG, G. et NAGEL, C., éditeurs : Advances in 3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, pages 197–210. Springer Berlin Heidelberg. Pages 41, 42, 60, et 259
- TRAPP, M., GLANDER, T., BUCHHOLZ, H. et DOLNER, J. (2008). 3d generalization lenses for interactive focus+ context visualization of virtual city models. *In Information Visualisation, 2008. IV'08. 12th International Conference*, pages 356–361. IEEE. Pages 42 et 259
- TRAPP, M., SCHNEIDER, L., LEHMANN, C., HOLZ, N. et DÖLLNER, J. (2011b). Strategies for Visualizing 3D Points-of-Interest on Mobile Devices. *Journal of Location Based Services (JLBS)*. Page 60
- UCAR, D. (1993). A semiological approach to typology of the map signs. *In 16th International Cartographic Conference*, Cologne, Allemagne. Page 66
- UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS, S. (2002). Valeur des paramètres des normes de TVHD pour la production et l'échange international de programmes. Rapport technique BT.709-5. Page 105
- VAN ANDEL, P. et BOURCIER, D. (2009). *La sérendipité dans les sciences, les arts et la décision : leçons de l'inattendu*. L'act mem. Page 9
- VAN GOETHEM, A., REIMER, A., SPECKMANN, B. et WOOD, J. (2014). Stenomaps : Shorthand for shapes. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 20(12):2053–2062. Page 66
- VANMALDEREN, L. (1982). Un glossaire de la sémiologie de l'image. *Communication et langages*, 54(1):10–24. Page 69

- WATSON, Z. (2012). Watercolor process. http://content.stamen.com/watercolor_process. Page 193
- WEI, L.-Y., LEFEBVRE, S., KWATRA, V., TURK, G. *et al.* (2009). State of the art in example-based texture synthesis. *In Eurographics 2009, State of the Art Report, EG-STAR*, pages 93–117. Page 79
- WILKENING, J. *et* FABRIKANT, S. I. (2011). How do decision time and realism affect map-based decision making? *In Proceedings of the 10th international conference on Spatial information theory, COSIT'11*, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. Page 78
- WOOD, D. N., FINKELSTEIN, A., HUGHES, J. F., THAYER, C. E. *et* SALESIN, D. H. (1997). Multiperspective panoramas for cel animation. *In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '97*, pages 243–250, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. Page 23
- WOOD, J., ISENBERG, P., ISENBERG, T., DYKES, J., BOUKHELIFA, N. *et* SLINGSBY, A. (2012). Sketchy Rendering for Information Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(12). Page 66
- XIAO, X. *et* MA, L. (2006). Color transfer in correlated color space. *In Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications*, pages 305–309. ACM. Pages 81 *et* 260
- YU, Q., NEYRET, F., BRUNETON, E. *et* HOLZSCHUCH, N. (2011). Lagrangian Texture Advection : Preserving both Spectrum and Velocity Field. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(11):1612–1623. Page 73
- ZANIN, C. *et* TRÉMOLO, M.-L. (2003). *Savoir faire une carte : Aide à la conception et à la réalisation d'un carte thématique univariée*. BelinSup Géographie. Belin, Paris, France. Page 103
- ZANOLA, S., FABRIKANT, S. I. *et* CÖLTEKIN, A. (2009). The effect of realism on the confidence in spatial data quality in stereoscopic 3D displays. *In 24th International Cartographic Conference*, Santiago, Chile. Page 78

Table des figures

1.1	Les composantes du RGE de l'IGN : extraits de la BD TOPO®, BD ORTHO®, BD PARCELLAIRE®, BD ADRESSE®, BD ALTI®.	4
1.2	Illustrations de données utiles à la géographie physique : données géologiques du BRGM ⁵ (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), données maritimes du SHOM ⁶ (Service hydrographique et océanographique de la marine), données météorologiques de Météo-France ⁷ et données forestières de l'IGN ⁸ .	4
1.3	Illustrations de données utiles à la géographie humaine : données de population de l'INSEE ⁹ , données de trafic du Setra ¹⁰ , données sur la consommation énergétique du Ministère du Développement Durable ¹¹ et données d'urbanisme, le Plan Local d'Urbanisme (PLU) de la ville de Vincennes ¹² .	5
1.4	Visualisations de données de trafic de Here ¹³ , et de données issues du service Vélip ¹⁴ .	5
1.5	Données topographiques du projet collaboratif OpenStreetMap ¹⁵ (OSM), données d'itinéraires de randonnées VTT du site communautaire Uttagawa ¹⁶ .	6
1.6	Représentations de données géolocalisées issues de Twitter ¹⁷ , Instagram ¹⁸ et Facebook ¹⁹ .	6
1.7	Triptyque cartographique et visualisation d'information géographique.	7
1.8	Différents fonds de cartes réalisés avec une même base de données géographique, disponibles sur le portail cartographique du projet OSM et adaptés à différents usages.	10
1.9	Adaptation de la carte de John Snow de l'épidémie de choléra de 1854 ²⁰ . Les décès sont représentés par des cercles rouges proportionnels au nombre de morts et les pompes à eau par des cercles jaune et noir. Le fond de carte est la représentation de style Toner proposée par l'agence de design Stamen ²¹ .	14
1.10	Spatiocarte de référence avant le passage du cyclone Omar sur les Antilles françaises en 2008, réalisée par le SERTIT ²² .	15
1.11	Le Géoportail de l'IGN, associé au Géocatalogue du BRGM.	16
1.12	Le géoportail Inspire	17
1.13	Utagawa ²³ , un site communautaire de passionnés de randonnées VTT.	19
1.14	Patchworks de représentations cartographiques. À gauche, extrait de la carte du <i>Chico Historical GIS</i> ²⁴ . Au centre, extrait de la carte <i>Open What Ever Map</i> ²⁵ . À droite, extrait de la carte de San Francisco sur le site <i>Surging Sea</i> ²⁶ .	21
1.15	Déformation interactive du relief par Jenny et al. [2011b].	21
1.16	Déformations pour la création de vues panoramiques : suivant un itinéraire par Jenny et al. [2011a], pour créer un profil urbain par Fund [2012], pour créer de longues scènes photographiques par Agarwala et al. [2006], et le long d'un itinéraire urbain par Grabler et al. [2008].	22
1.17	Visualisation cartographique intégrant une projection progressive, par Jenny et al. [2010c] et Pasewaldt et al. [2011, 2014].	23
1.18	Continuum de réalité et de virtualité, d'après Milgram et Kishino [1994].	23
1.19	Exemple d'application de virtualité augmentée dans lequel des photos de fenêtres et d'écran d'ordinateur ont été intégrées dans une scène virtuelle, à gauche, d'après Simsarian et Akesson [1997]. Exemple d'application de réalité augmentée dans lequel des informations sur les métros proches sont ajoutées en temps réel à la vidéo capturée par un smartphone, à droite, d'après Acrossair [2011].	24

1.20 Exemples d'applications de cartographie augmentée pour l'aide à l'évacuation, à gauche d'après Reitmayer et al. [2005] , et de territoire augmenté pour identifier les sommets, à droite d'après PeakAR [2011]	25
1.21 Utilisation de fond orthophotographique pour superposer des informations complémentaires vectorielles : la trajectoire et l'intensité de l'ouragan Katrina de 2005 ²⁷ à gauche ; et la pollution de l'air à Paris lors d'un pic de pollution ²⁸ à droite.	27
1.22 Exemple de résultats de travaux de télédétection pour l'étude du changement. Image d'origine, comparaison de plusieurs méthodes de classification de l'occupation du sol (champs et forêts), carte de probabilité de changement, et changements détectés entre les différentes classifications, d'après Gressin et al. [2014]	28
1.23 Utilisation de fond orthophotographique pour l'aide à la saisie de données géographiques : à gauche sur le site de RPart ²⁹ de l'IGN, et à droite sur le site Télépac ³⁰	29
1.24 Représentations et applications cartographiques pour la détection d'objets géographiques sur un fond orthophotographique : à gauche suite à la disparition du vol MH370 au large de la Malaisie ⁸² , et à droite au début de la crise internationale en Crimée ⁸¹	29
1.25 Outil interactif de parcours d'un itinéraire par Alvina et al. [2014]	30
1.26 Différentes fonctionnalités proposées à l'utilisateur pour choisir son fond de carte sur le service de cartographie en ligne Bing Maps ⁸⁵	33
1.27 Curseurs de fondu enchaîné entre deux représentations cartographiques : à gauche sur le plan interactif de la ville de Lannion ⁸⁶ et à droite sur le géoportail du Luxembourg ⁸⁷	33
1.28 Fonctionnalités de construction de son fond de carte sur le Géoportail® ³¹ de l'IGN.	34
1.29 Visualisation d'une carte historique ³² , et d'une photo historique ³³ , dans leur contexte cartographique et photographique actuel.	36
1.30 Fenêtres cartographiques laissant apparaître une représentation d'un autre style et/ou d'une autre temporalité : à gauche pour comparer le monde entre 1812 et 2013 ³⁴ , au centre dans l'application Cartofact ³⁵ et à droite pour étudier l'évolution de Chicago ³⁶ suite à l'incendie de 1868.	37
1.31 Exemple de carte de situation sur le Géoportail ⁴ , d'aperçu miniature dans GoogleMaps ³⁶	38
1.32 Exemple de loupe par grossissement sur un site commercial de vente de vêtements sportifs ³⁷ , et de loupe cartographique présentant une représentation généralisée dans l'application Cartifact ³⁸	38
1.33 Outils de swipe : Glisser pour covisualiser deux représentations. a) Illustration de la fonte des glaces sur le glacier de Morteratsch ³⁹ b) Illustration du pôle Nord avec et sans glace par la Nasa ⁴⁰ c) Illustration de la température dans la Vallée de la mort ⁴¹ d) Simulation de la montée des eaux dans le Maryland ⁴² e) Étude des dégâts de la guerre à Gaza en 2014 ⁴³ f) Illustration de l'évolution de la carte du projet OSM ⁴⁴	39
1.34 Vues asservies : à gauche sur le portail Géobretagne ¹¹¹ et à droite sur le site de l'IAU ¹¹²	41
1.35 Exemples de méthodes de focalisation de l'attention par Pindat et al. [2012] , et Bektas et Çöltekin [2012] ; Bektas et al. [2015]	42
1.36 Exemples de méthodes de focalisation de l'attention par Trapp et al. [2011a] et Trapp et al. [2008]	42
1.37 Exemple de projection adaptée à un continent et minimisant les déformations sur la zone d'intérêt centrale.	43
1.38 Informations collectées	46
1.39 Diversité des sites sélectionnés.	47
1.40 Fonds de cartes proposés par défaut dans les sites étudiés.	47
1.41 Disponibilité des couches au sein du panel de sites.	48
1.42 Répartition des représentations selon les différents types de fonds.	49
1.43 Catégories de visualisations rencontrées	50
1.44 Configurations et niveaux de transparence des représentations utilisées pour créer des représentations mixtes.	51

1.45 Exemple de représentation mixte construite par superposition d'une carte opaque et d'une orthophotographie à 80% d'opacité.	52
2.1 Mise en œuvre des sept variables visuelles de Bertin selon les trois modes d'implantation. [Bertin, 1967] .	57
2.2 Triangle sémiotique adapté à la cartographie, revisité par Fabrikant [2011], d'après Peirce [1978] et MacEachren [1995]	59
2.3 Méthode de symbolisation adaptative par Albertz et Lehmann [2005] et de symbolisation survivante par Raposo et Brewer [2013].	61
2.4 Diversité des styles cartographiques identifiés par Field et Demaj [2012] comme représentatifs de l'excellence cartographique.	62
2.5 Art abstrait : Wassily Kandinsky, Piet Mondrian et Sonia Delaunay	63
2.6 Projections cartographiques ⁴⁵	64
2.7 Résultat de généralisation au 1/50 000 ^{ième} par le modèle CollaGen par Touya [2011].	65
2.8 Exemples d'abstractions géométriques extrêmes : anamorphose ⁴⁶ , plan du métro de la ville de Paris ⁴⁷ et chorème par Brunet [1973].	66
2.9 Abstraction automatisée d'une image, par Semmo <i>et al.</i> [2010].	67
2.10 Aquarellisation par traitement d'images par Bousseau <i>et al.</i> [2006].	68
2.11 Différents effets de matière réalisés avec la bibliothèque Arnorld [Langlands, 2014].	70
2.12 Texture procédurale à base de bruit de Perlin : échantillon et application à la synthèse d'une image d'un vase en marbre par Perlin [1985]	71
2.13 Plan des pistes de la station de ski Barrège-La Mongie réalisé numériquement par la société Kalibblue ⁴⁸ . .	71
2.14 Carte réaliste par Patterson ⁴⁹ et carte pseudo-naturelle par Jenny ⁵⁰	72
2.15 Exemple de mise en valeur esthétique de données géographiques par l'utilisation de logiciels de dessin assisté par ordinateur, par François Gueydon. ⁵¹	73
2.16 Exemple d'utilisation des modes de blending dans QGIS, par Nathan Woodrow ⁵²	74
2.17 Textures variées représentatives des recherches en rendu non photoréaliste par Bénard <i>et al.</i> [2009]. . . .	74
2.18 Textures vectorielles par Loi <i>et al.</i> [2013].	75
2.19 Méthodes de dessin automatique du rocher par Gilgen et Jenny [2010], Lysák et Traurig [2013] et Loi [2013].	75
2.20 Méthodes de génération d'un semis de symboles cartographiques par [Jenny <i>et al.</i> , 2010a], Landes <i>et al.</i> [2013] Jenny <i>et al.</i> [2010b] et Hurtut et Lecordix [2011].	75
2.21 Exemples de continuums de styles réalisés par paramétrisation progressive des méthodes de rendu : Slider texturé par Lasram <i>et al.</i> [2012], Modèles 3D de ville par Biljecki ⁵³ , Visualisation de degré d'abstraction localement inhomogène par Semmo <i>et al.</i> [2012].	77
2.22 Rendu paramétrable des textures [Semmo et Döllner, 2014a], et des rivières [Semmo <i>et al.</i> , 2013].	77
2.23 Outil interactif de manipulation du degré d'abstraction par Semmo et Döllner [2014b].	78
2.24 Panorama artistique texturé par l'exemple, par Jenny et Jenny [2013].	80
2.25 Exemple d'extraction automatique d'une palette de couleur, par Barla [2006].	80
2.26 Transferts de couleurs d'une orthophoto et d'une photo de paysage dans des cartes topographiques selon la méthode de Xiao et Ma [2006], réalisés par Arbelot [2012].	81
2.27 Langages graphiques de combinaison de briques de légende cartographique : pour la cartographie thématique à gauche par Brewer [1999], et dans l'outil d'exploration de réseau Geographlab à droite par Mermet [2011].	82
3.1 Panel d'orthophotographies du territoire français métropolitain (BD ORTHO®).	86

3.2	Panel de cartes topographiques du territoire français métropolitain (SCAN 25®).	87
3.3	Luminosités moyennes pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.	88
3.4	Saturations moyennes pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.	88
3.5	Diversité des luminosités pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.	89
3.6	Diversité des saturations pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.	89
3.7	Diversité des teintes pour chaque couple orthophoto/carte du panel sélectionné, dans le système colorimétrique CIELCh.	89
3.8	Exemple de synthèse colorée	91
3.9	Synthèses colorées des orthophotographies de notre panel.	92
3.10	Synthèses colorées des cartes topographiques de notre panel.	93
3.11	Exemples de covisualisation par transparence d'une carte et d'une orthophoto.	94
3.12	Symbolisations cartographiques de la forêt	95
3.13	Choix de représentations ordonnées pour créer un chemin continu.	96
3.14	Exemples de représentations plus ou moins homogènes visuellement.	98
3.15	Synthèse et modifications prévues du processus cartographique.	99
4.1	Extraction du bleu majoritaire de la mer	101
4.2	Extraction et réinjection des couleurs naturelles de l'orthophotographie.	102
4.3	Exemples de textures des catégories de notre typologie de texture	104
4.4	Effet de la transparence sur la couleur et utilisation indépendante des caractéristiques de couleur et de texture transparente.	105
4.5	Représentation cartographique issue de la réinjection des caractéristiques graphiques naturelles de couleur et de texture par transparence.	106
4.6	Les différents modes de mélange coloré décrit dans la norme <i>Compositing and Blending</i> [Cabanier et Andronikos, 2015].	107
4.7	Combinaison d'une carte topographique avec une orthophotographie en couleur et en niveaux de gris par le mode overlay.	108
4.8	Exemple de coloration de la texture de Perlin	108
4.9	Variation des paramètres de la texture de Perlin, à la manière des variables visuelles.	109
4.10	Exemple d'utilisation de la texture de Perlin pour créer une carte pseudo réaliste.	110
4.11	Réinjection des caractéristiques graphiques des extrémités pour créer une texture procédurale pivot.	111
4.12	Exemples de symbolisations de routes sur fond orthophotographique.	112
4.13	Alourdis cartographiques	113
4.14	Méthode de symbolisation localement adaptative	114
4.15	Exemples de contextes graphiques extraits pour un ensemble de tronçons routiers	115
4.16	Détermination du gris complémentaire d'une couleur	116
4.17	Couleurs et gris complémentaires plus ou moins saturés	117
4.18	Représentation localement adaptative des contours du réseau routier par couleur unie pour chaque tronçon de route.	118
4.19	Représentation localement adaptative des contours du réseau routier en dégradés colorés sur chaque tronçon de route.	119

4.20	Comparaison des symbolisations localement adaptatives et des symbolisations traditionnelles	120
4.21	Décomposition séquentielle de la méthode d'interpolation de symbolisations.	121
4.22	Ensemble de sous-arbres de légende issus d'un même arbre commun.	122
4.23	Modélisation des normes de symbolisation cartographique SE/SLD sur lesquelles nous nous appuyons.	123
4.24	Exemple de symbolisations extrêmes pour symboliser des objets surfaciques	125
4.25	Symbolisation de médiation pour l'interpolation entre les symbolisations de la figure 4.24.	126
4.26	Exemples de symbolisation intermédiaires entre celles de la figure 4.24 grâce à la symbolisation de médiation présentée en figure 4.25.	127
4.27	Dégradé de couleurs dans le système CIELab	128
4.28	Comparaison de dégradés linéaires dans le système CIELab et le système RVB.	129
4.29	Couleur progressive pour une carte vectorielle	130
4.30	Processus de désaturation et éclaircissement progressif de l'orthophotographie	131
4.31	Désaturation et éclaircissement progressifs d'une orthophotographie.	132
4.32	Double dégradé coloré dans la texture de Perlin.	133
4.33	Utilisation progressive de la transparence pour faire disparaître la mer.	134
4.34	Disparition de la texture par variation de la quantité en haut et de la couleur en bas.	135
4.35	Diversité des possibles cartographiques issus de l'utilisation des briques de symbolisation	136
4.36	Exemple de combinaison de briques pour passer d'un aplat à une texture naturelle	137
4.37	Combinaisons de briques	138
4.38	Combinaisons possibles des briques de coloration et de transparence progressives	139
4.39	Représentations cartographiques présentant des symbolisations non homogènes en terme de degré de réalisme et d'abstraction.	140
4.40	Usage de cartes et de photos aériennes	142
4.41	Supports visuels du test utilisateur : échantillons de symbolisations perçues.	143
4.42	Moyennes des degrés de photoréalisme estimés par les participants.	144
4.43	Écart-types des réponses des participants	145
4.44	Analyse des résultats selon la méthode des matrices de Bertin : Ordonnancement des symbolisations selon la part en pourcentage des estimations positives de degré de photoréalisme relatif par les participants.	146
4.45	Ordonnancement des symbolisations selon un degré de photoréalisme partagé issu de l'analyse par matrice de Bertin présentée en figure 4.44.	147
4.46	Comparaison de couples de symbolisation : sélection de la symbolisation la plus photoréaliste par les participants (en orange pour la sélection de gauche, et en bleu pour la sélection de droite).	148
4.47	Ordonnancement des symbolisations selon un degré de photoréalisme	149
4.48	Ordonnancement des symbolisations par les participants.	149
4.49	Continuum majoritaire créé par les utilisateurs.	150
4.50	Création d'un chemin graphique par le choix d'une symbolisation pivot.	151
4.51	Symbolisations pivots sélectionnées (entourées en bleu) par les participants pour créer six chemins graphiques.	152
4.52	Part des participants ayant choisi la symbolisation pivot entourée en bleu en figure 4.51	152
4.53	Comparaison des chemins sélectionnés et proposés aux participants	153
4.54	Ordonnancement des symbolisations par les participants.	153
4.55	Continuum majoritaire et briques de symbolisation progressive de transition entre les symbolisations.	154
4.56	Déclenchement des briques de symbolisation pour créer le continuum de la figure 4.55	154
4.57	Représentations cartographiques proposées aux participants pour paramétrer la symbolisation de la végétation par rapport aux autres thèmes.	155

4.58	Calibration de la symbolisation de la végétation par rapport à la représentation cartographique globale . . .	155
4.59	Degré de photoréalisme moyen sélectionné pour la végétation au regard de la représentation globale. . . .	156
4.60	Représentations incluant la symbolisation moyenne de la végétation choisie par les participants.	156
5.1	Extrait du SCAN Express 25® de l'IGN.	159
5.2	Carte topographique réalisée avec les données sélectionnées pour la mise en œuvre.	160
5.3	Orthophotographie de notre zone d'étude, extrait de la BD ORTHO®.	161
5.4	Notre prototype intégré à l'interface de visualisation de GeOxygene.	162
5.5	Architecture de notre prototype.	163
5.6	Chaine de rendu en deux passes pour combiner les briques d'interpolation et d'adaptation locale des symbolisations.	163
5.7	Modèle complet pour la conception de représentations cartographiques intermédiaires	165
5.8	Extraits de symbolisations de la mer dans nos extrémités cartographiques.	166
5.9	Représentation progressive de la mer par interpolation de transparence ou de couleur et de transparence.	167
5.10	Représentation progressive des routes par interpolation de couleurs.	169
5.11	Extraits de symbolisations des bâtiments dans nos extrémités cartographiques.	170
5.12	Représentation progressive du bâti par interpolation de couleur et de transparence.	171
5.13	Paramétrage des briques de symbolisation par le degré de photoréalisme perçu.	172
5.14	Représentation progressive de la forêt dans une représentation cartographique par combinaison de six briques d'interpolation de symbolisations.	173
5.15	Extrait de fond de carte et de fond orthophotographique sur un même territoire.	174
5.16	Représentation progressive du fond de carte dans une représentation cartographique.	175
5.17	Extrémités et représentations cartographiques intermédiaires de notre continuum entre abstraction et réalisme.	177
5.18	Extraits de la carte et de représentations cartographiques intermédiaires de notre continuum entre abstraction et réalisme.	178
5.19	Extraits de l'orthophotographie et de représentations cartographiques intermédiaires de notre continuum entre abstraction et réalisme.	179
6.1	Exemples d'intégration d'un continuum cartographique dans des outils de covisualisation interactifs. . . .	186
6.2	À gauche, création interactive de représentations mixtes à partir du continuum. À droite, transition graphique douce par transparence.	187
6.3	Exemple d'adaptation locale de la symbolisation des toponymes en utilisant la couleur inverse au contexte graphique, d'après Escriva [2013]	191
6.4	Ombres cartographiques et naturels inversés.	192
6.5	Architecture client-serveur avec processus cartographique précalculé côté serveur.	194
6.6	Architecture client-serveur avec processus cartographique à la volée côté client.	195
6.7	Architecture client-serveur avec processus cartographique à la volée côté serveur.	195
A.1	Différents types de géométrie pour modéliser des objets géographiques délimités. À gauche : Le monde réel tel qu'il peut être perçu. Au centre : Une modélisation vectorielle. À droite : Une modélisation raster.	199
A.2	Différents types de géométrie pour modéliser un phénomène géographique continu, le relief. À gauche : Le relief tel qu'il peut être perçu. Au centre : Une modélisation vectorielle du relief, par des courbes de niveaux. À Droite : Une modélisation raster du relief, par un Modèle Numérique de Terrain (MNT) en niveaux de gris.	199
A.3	Assemblage des canaux RVB pour former une image en couleur.	200

A.4	Extrait du SCAN 25.	200
A.5	Exemples d'opérateurs de généralisation ayant pour objectif de caricature la forme, la distribution, ou le positionnement des objets, issus de [Gaffuri, 2008], d'après [Mustière, 2001]	201
A.6	Complémentarité des caractéristiques géométriques des données topographiques	202
C.1	Choix interactif d'une représentation cartographique.	208
C.2	Ordonnancement interactif d'un ensemble de symbolisations	209
C.3	Paramétrage interactif d'une symbolisation au sein d'une représentation	209
C.4	Données de végétation utilisées pour construire les visuels du test.	210
C.5	Paramètres graphiques décrivant les symbolisations des visuels du test.	211
C.6	Question 1	212
C.7	Question 2	213
C.8	Question 3	213
C.9	Question 4a - Comparaison de textures neutres de différentes couleurs.	214
C.10	Question 4b - Comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture naturelle par transparence.	214
C.11	Question 4c - Comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture naturelle par transparence, indépendamment de la couleur.	215
C.12	Question 4d - Comparaison d'une texture neutre et d'une texture procédurale de Perlin.	215
C.13	Question 4e - Comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin).	215
C.14	Question 4f - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin), indépendamment de la couleur.	216
C.15	Question 4g - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture neutre	216
C.16	Question 4h - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture naturelle par overlay.	216
C.17	Question 4i - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture procédurale de Perlin, indépendamment de la couleur.	217
C.18	Question 4j - Comparaison d'une texture naturelle par transparence et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin).	217
C.19	Question 4k - Comparaison d'une texture procédurale de Perlin et d'une texture mixte (naturelle par transparence et procédurale de Perlin), indépendamment de la couleur.	217
C.20	Question 5a	218
C.21	Question 5b - Créer un chemin pour passer d'une texture neutre vert clair à une texture naturelle par transparence vert foncé.	218
C.22	Question 5c - Créer un chemin pour passer d'une texture neutre de couleur réaliste à une texture naturelle par transparence de couleur abstraite.	219
C.23	Question 5d - Créer un chemin pour passer d'une texture neutre vert clair à une texture procédurale vert moyen et vert foncé.	219
C.24	Question 5e - Créer un chemin pour passer d'une texture neutre de couleur réaliste à une texture procédurale de couleur abstraite.	219
C.25	Question 5f - Créer un chemin pour passer d'une texture procédurale de couleurs claires à une texture mixte de couleurs foncées.	220
C.26	Question 5g - Créer un chemin pour passer d'une texture procédurale de couleurs réalistes à une texture mixte de couleurs abstraites.	220
C.27	Question 6	221
C.28	Question 7 : Énoncé et visuels de support	221

C.29 Question 8 : Profil utilisateur	222
C.30 Domaine(s) professionnel(s) des participants au test utilisateur.	223
C.31 Usages des cartes topographiques	223
C.32 Conception et type de cartes	224
C.33 Usage de photos aériennes	224
C.34 Moyenne, écart-type et minimum des temps de réponse au questionnaire complet.	225
C.35 Moyennes et écarts-types des temps de réponse aux questions posées	225
C.36 Temps de réponse moyens aux différentes questions du test	225
C.37 Nombre de réponses selon le type d'occupation du sol sélectionné	226
C.38 Tableau synthétique des estimations de degré de photoréalisme perçu.	228
C.39 Répartition des valeurs moyennes et maximums	228
C.40 Répartition des écart-types	229
C.41 Symbolisations positionnées selon leur degré de photoréalisme estimé moyen.	229
C.42 Résultats relatifs entre les symbolisations deux à deux	230
C.43 Ordonnement des symbolisations selon leurs degrés de photoréalisme relatifs	231
C.44 Nombre d'apparition des cartes dans les différentes positions de la série	231
C.45 Ordonnement des symbolisations par les participants	231
C.46 Reconstitution d'un continuum majoritaire	232
C.47 Nombre d'apparition des cartes dans les différentes positions de la série	232
C.48 Résultats de la question 4	233
C.49 Résultats de la question 4a	233
C.50 Résultats de la question 4b	234
C.51 Résultats de la question 4c	234
C.52 Résultats de la question 4d	234
C.53 Résultats de la question 4e	234
C.54 Résultats de la question 4f	235
C.55 Résultats de la question 4g	235
C.56 Résultats de la question 4h	235
C.57 Résultats de la question 4i	236
C.58 Résultats de la question 4j	236
C.59 Résultats de la question 4k	236
C.60 Synthèse des résultats de la question 4	237
C.61 Nombre d'apparition des cartes dans les différentes positions de la série	237
C.62 Ordonnement des symbolisations par les participants	237
C.63 Reconstitution d'un continuum majoritaire	238
C.64 Résultats de la question 5b	238
C.65 Résultats de la question 5c	239
C.66 Résultats de la question 5d	239
C.67 Résultats de la question 5e	239
C.68 Résultats de la question 5f	240
C.69 Résultats de la question 5g	240
C.70 Synthèse des résultats des questions 5b à 5g	240
C.71 Nombre d'apparition des cartes dans les différentes positions de la série	241
C.72 Séries créées par les participants dans lesquelles les cartes sont numérotées comme dans le tableau de la figure C.71, en pourcentage des réponses des participants.	241

C.73 Résultats de la question 7	242
C.74 Représentation de la question 7a avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.	242
C.75 Représentation de la question 7b avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.	242
C.76 Représentation de la question 7c avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.	243
C.77 Représentation de la question 7d avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.	243
C.78 Représentation de la question 7e avec la symbolisation de la végétation paramétrée avec la réponse moyenne des participants.	243
C.79 Évolution du degré de photoréalisme de la symbolisation de la végétation paramétrée par les utilisateurs, au regard du degré de photoréalisme des représentations de support.	244

Publications personnelles principales

HOARAU, C., S. CHRISTOPHE AND S. MUSTIÈRE (2015) Sliding from imagery realism to topographic abstraction, *27th International Cartographic Conference (ICC'15), Rio de Janeiro, Brasil. (abstract)*

CHRISTOPHE, S., C. HOARAU, L. BOULANGER, J. TURBET AND D. VANDERHAEGHE (2015) Automatic rendering of a Cassini style, *27th International Cartographic Conference (ICC'15), Rio de Janeiro, Brasil. (abstract)*

JENNY, B., J. BUDDEBERG, C. HOARAU AND J. LIEM (2015) Plan oblique relief for web maps., *Cartography and Geographic Information Science*, [doi: 10.1080/15230406.2015.1015169](https://doi.org/10.1080/15230406.2015.1015169)

JENNY, B., J. BUDDEBERG, C. HOARAU AND J. LIEM (2014) Plan Oblique Relief for Web Maps, *AutoCarto 2014 Conference*

HOARAU, C. (2014) Représentations cartographiques intermédiaires entre photoréalisme et abstraction topographique, *23ème Journées de la Recherche de l'IGN, mar 2014*

HOARAU, C. (2014) Comment naviguer entre photoréalisme et abstraction topographique en covisualisant des cartes et des orthoimages ?, *Décryptagéo - Les Rencontres, avr 2014*

CHRISTOPHE, S., J. PERRET AND C. HOARAU (2013) Extraction de palettes de couleurs pour l'aide à la conception cartographique, *Revue des Sciences et Technologies de l'Information (RSTI) série Technique et science informatiques (TSI), Art et Informatique*, vol. 32, n. 3-4, pp. 145-152, [doi: DOI: 10.3166/TSI.32.401-429](https://doi.org/10.3166/TSI.32.401-429)

HOARAU, C., S. CHRISTOPHE AND S. MUSTIÈRE (2013) Mixing, blending, merging or scrambling topographic maps and orthoimagery in geovisualizations ?, *26th International Cartographic Conference (ICC'13)*

HOARAU, C., S. CHRISTOPHE AND S. MUSTIÈRE (2013) Entre cartes topographiques et orthoimages - Mélanger, combiner, fusionner ou emmêler ces géo-visualisations ?, *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, vol. 217, pp. 87-99

CHRISTOPHE, S. AND C. HOARAU (2012) Expressive map design based on Pop Art : revisit of Graphic Semiology ?, *Cartographic Perspectives*, vol. 73, pp. 61-74

HOARAU, C. (2012) Orthoimage or map visualization in use in geoportals. Case study on the French Geoportal., *17th AutoCarto Conference (AutoCarto'12)*

CHRISTOPHE, S., C. HOARAU, A. KASBARIAN AND A. AUDUSSEAU (2012) A framework to make Pop Art map design, *Giscience* 2012

HOARAU, C. (2012) Entre réalisme et abstraction cartographique - Représentations cartographiques intermédiaires, *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, vol. 213, pp. 131-138

KASBARIAN, A., A. AUDUSSEAU, C. HOARAU AND S. CHRISTOPHE (2012) Conception de cartes stylisées - Exemple du Pop Art, *Cartes & Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, vol. 213, pp. 145-152

HOARAU, C. (2012) Représentations Cartographiques entre réalisme photographique et abstraction classique, *Journée Art et Cartographie*, Besançon, Mars 2012

HOARAU, C. (2011) Reaching a Compromise between Contextual Constraints and Cartographic Rules : Application to Sustainable Maps., *Cartography and Geographic Information Society Journal*, vol. 38, n. 2, pp. 79-88, [doi: 10.1559/1523040638279](https://doi.org/10.1559/1523040638279)

Représentations cartographiques intermédiaires

Comment covisualiser une carte et une orthophotographie pour naviguer entre abstraction et réalisme ?

Deux représentations du territoire sont majoritairement proposées pour être covisualisées de multiples façons (loupe, curseurs, vues asservies, etc.) : la carte topographique et l'orthophotographie. Ces deux représentations apportent une vision complémentaire du territoire : la carte topographique est l'archétype même de l'abstraction et l'orthophotographie renvoie une perception réaliste du territoire. Pour permettre à l'utilisateur de covisualiser ces deux types de représentations, nous préconisons de ne pas chercher un mélange graphique idéal mais plutôt de produire un continuum cartographique formé d'un ensemble continu de représentations intermédiaires mixant données topographiques et orthophotographie. Notre objectif est de permettre à l'utilisateur de choisir sa position entre les deux extrémités en contrôlant le degré de réalisme et d'abstraction tout au long du continuum.

Notre approche se fonde sur la nécessité d'adaptation locale de la symbolisation des données topographiques pour assurer la lisibilité de chaque représentation intermédiaire, la création de transitions graphiques pour établir une continuité entre ces représentations, et la synchronisation des symbolisations visant à garantir une homogénéité visuelle de ces représentations mixtes. Nous proposons une méthode de conception reposant sur la combinaison de briques de symbolisation élémentaires. Le premier type de brique consiste à interpoler les paramètres de symbolisation de la norme SLD tels que la couleur, la transparence ou la texture (procédurale, naturelle, ou mixée) entre deux symbolisations données. Le second type de brique analyse le contexte graphique des objets à mettre en valeur afin de déterminer localement une symbolisation adaptée et lisible. Ces briques sont combinées pour chaque thème et coordonnées entre les différents thèmes. Nous émettons des préconisations de paramétrage de ces étapes de conception à partir des résultats de notre test utilisateur visant à estimer le degré de réalisme et d'abstraction des symbolisations cartographiques. Enfin, nous mettons en œuvre cette méthode de conception au sein de la plateforme de recherche GeOxylene sous la forme d'un outil permettant de naviguer dans un continuum cartographique entre réalisme et abstraction.

Mots Clés : Géovisualisation, Visualisation, Covisualisation, Cartographie, Symbolisation adaptative, Interpolation de symbolisations, Continuum cartographique, Représentation intermédiaire, Réalisme, Abstraction

In-between cartographic representations

How to covisualize maps and orthoimages to browse abstraction and realism ?

Two representations of the territory are widely provided simultaneously to the user through interactive tools (such as magnifiers, sliders or swipes): topographic maps and orthoimages. They provide complementary visions of the territory because of abstraction steps used to design maps and the intrinsic perceived photorealism power of orthoimages. Aiming at providing efficient covisualizations of these two representations to the user, we advise not to search for an ideal graphic mix, but to produce a cartographic continuum composed of in-between representations mixing topographic data and orthoimagery. Our objective is to provide interactive tools allowing to choose an intermediate step within the continuum by controlling the realism and abstraction levels.

Our approach is based on three principles: first, the need for local adaptation of vector data symbolisation to preserve their readability, second, the call for graphic transitions to establish a continuity through in-between cartographic representations, and third the required control over realism level in order to ensure a visual consistency of hybrid visualisations. We provide elementary symbolisation methods to be combined in a global design process. The first one aims at interpolating SLD symbolisation parameters such as color, opacity or texturing between two symbolisations. The second one aims at defining a local symbolisation depending on the graphic context of objects to be highlighted. Those symbolisations are combined for each theme and synchronized for all themes. For these design steps, we provide guidelines based on the evaluation of the realism level coming from our user test. Finally we build a prototype software allowing to test our propositions and browse in-between representations from abstraction to realism through an interactive slider.

Keywords : Geovisualization, Visualization, Covisualization, Map design, Adaptive symbolisation, Symbolization interpolation, Cartographic continuum, In-between representations, Realism, Abstraction.